

MICHEL-ALAIN COMBES

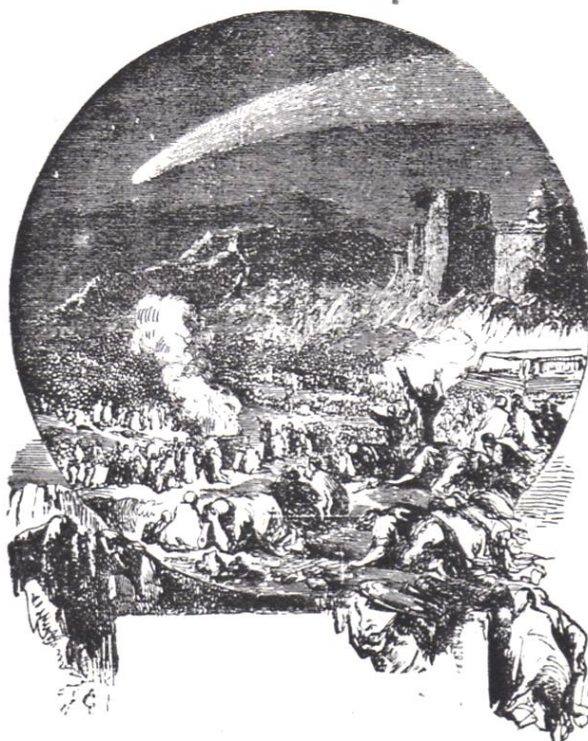


LA TERRE BOMBARDÉE

version 4.1 / 2013



MICHEL-ALAIN COMBES



LA TERRE BOMBARDÉE

version 4.1 / 2013

© Michel-Alain Combes, 2013

Publications de l'auteur

Contribution à l'étude des EGA. Étude générale sur les astéroïdes qui s'approchent de la Terre et sur leurs relations avec l'impactisme terrestre (thèse Paris VI), 1979

La Terre bombardée (version 1), 1982

La Terre bombardée (version 2), 1998

La menace du ciel, 1999

La comète de Whiston, 2000 (S-F)

L'histoire cosmique des hommes, 2006 et 2011

La Terre bombardée 2007 (version 3), avec le concours d'Axel Vincent-Randonnier (version illustrée de plus de 200 figures)

La Terre bombardée (version 4), 2012

Une soixantaine d'articles sur les astéroïdes et les comètes parus dans les revues

L'Astronomie (entre 1971 et 2005)

Observations et Travaux (entre 1992 et 1997)

et dans d'autres revues à l'étranger (Belgique, Pays-Bas, États-Unis)

certaines de ces articles ont été publiés en collaboration avec Jean Meeus

Sur le site **LA MENACE DU CIEL**, hébergé par ASTROSURF depuis 2001

Pages spécialisées sur les NEO et l'impactisme et le catastrophisme

Nombreux tableaux sur les NEA (Near Earth Asteroids)

Pour les Conférences 2008 et 2010 sur la QUANTAVOLUTION

articles spécialisés

Articles sur le catastrophisme dans la revue : *Histoire & Cataclysmes*

SOMMAIRE

Avant-propos : Un livre d'astronome, p. 7

Introduction : Le renouveau des idées catastrophistes, p. 13

PARTIE 1 : L'évolution des idées catastrophistes

Chapitre 1 : Le catastrophisme dans l'Antiquité, p. 23

Chapitre 2 : Déluge et catastrophisme biblique, p. 39

Chapitre 3 : La grande époque des catastrophistes, p. 57

Chapitre 4 : Impactisme et catastrophisme aujourd'hui, p. 81

PARTIE 2 : Les causes

Chapitre 5 : Un univers cataclysmique, partout, toujours, p. 99

Chapitre 6 : Les astéroïdes qui frôlent la Terre, p. 121

Chapitre 7 : Les comètes, p. 151

Chapitre 8 : L'impactisme invisible, p. 181

PARTIE 3 : Les preuves

Chapitre 9 : L'événement de la Toungouska en 1908, p. 209

Chapitre 10 : Les météorites et les météores, p. 229

Chapitre 11 : Les astroblèmes et les tectites, p. 255

Chapitre 12 : La mort des dinosaures, p. 279

PARTIE 4 : Les conséquences

Chapitre 13 : Les conséquences terrestres, p. 301

Chapitre 14 : L'origine cosmique de la vie, p. 329

Chapitre 15 : Extinctions et évolution, p. 351

Chapitre 16 : La vie et la mort viennent du cosmos, p. 371

PARTIE 5 : L'histoire cosmique des hommes

Chapitre 17 : Les fausses pistes, p. 401

Chapitre 18 : Cataclysmes terrestres dans l'Antiquité, p. 425

Chapitre 19 : 13 000 ans de cataclysmes cosmiques, p. 449

Chapitre 20 : L'inconnu, l'avenir, p. 483

Conclusion : Une révolution scientifique et culturelle, p. 503

Bibliographie, p. 513

Sites Internet, p. 517

Index des noms, p. 521

Annexes, p. 529

Table des matières, p. 537

AVANT-PROPOS

UN LIVRE D'ASTRONOME

Impactisme et catastrophisme

Pour résumer ce gros livre en une seule phrase, on peut écrire qu'il est une étude historique et scientifique de l'impactisme et du catastrophisme faite par un astronome.

C'est dire l'éclectisme ouvertement affiché de ce livre qui se veut un jalon historique, un bilan actuel. Un jalon seulement, car la science évolue vite (trop vite aux yeux de certains), malgré de puissantes forces contraires, comme le lobby du créationnisme qui lutte désespérément pour sauver la crédibilité d'un dogme usé par le temps : celui de la Création, et qui doit trouver maintenant des appuis politiques pour le faire perdurer encore, les appuis scientifiques, quoique nombreux et parfois prestigieux, s'avérant notoirement insuffisants.

Comme l'ont écrit naguère François Arago (1786-1853) et, après lui, Camille Flammarion (1842-1925) : "*Croire tout découvert est une erreur profonde, c'est prendre l'horizon pour les bornes du monde*". Ces deux chantres de l'astronomie populaire avaient bien compris que les connaissances de leur époque allaient être, sinon balayées, tout au moins totalement renouvelées en quelques décennies. On peut dire la même chose aujourd'hui, et la réalité de demain pourrait bien dépasser la fiction la plus échevelée dans certains domaines étudiés dans ce livre.

Bien qu'il se veuille résolument multidisciplinaire, il n'en demeure pas moins que *La Terre bombardée* est un livre d'astronome. Il ne peut pas en être autrement. C'est la raison principale pour laquelle il est sensiblement différent de ceux qui ont été (ou qui auraient pu être) écrits par un paléontologue, un géologue, un physicien, un astrophysicien, un biologiste, un historien des sciences ou un autre scientifique. L'impactisme et le catastrophisme (scientifique) sont des sujets d'étude multiformes et complexes, ce qui fait à la fois leur intérêt et leur difficulté. Personne ne peut en effet prétendre connaître les diverses spécialités concernées (une grosse dizaine) avec une profondeur suffisante et les approches sont forcément parcellaires, sélectives, chaque scientifique privilégiant obligatoirement sa spécialité au détriment des autres qu'il connaît moins bien.

Il n'empêche que l'impactisme est avant tout un problème astronomique, car nous vivons dans un Univers, et donc dans un Système solaire et localement sur une Terre, où le cataclysme est la règle permanente, comme je le montrerai tout au long de ce livre. Le catastrophisme terrestre n'est que l'expression locale, infinitésimale dans l'espace et dans le temps, d'un phénomène global qui défie l'imagination la plus débridée. Le cataclysme est

la règle, PARTOUT, TOUJOURS. Cette vérité essentielle doit être martelée sans relâche et enseignée dès maintenant aux jeunes générations. Elle sera l'un des nouveaux dogmes scientifiques du XXI^e siècle, et pas seulement un dogme astronomique, à usage restreint, pour les seuls connaisseurs des choses du ciel.

Définitions de l'impactisme et du catastrophisme

Si l'on ouvre trois dictionnaires usuels comme le *Robert*, le *Larousse* ou le *Hachette*, on a déjà une mauvaise surprise. Les trois ignorent totalement le concept d'*impactisme*. Le *Robert* ne connaît pas non plus le *catastrophisme* qui, par contre, figure dans le *Larousse* avec la définition suivante :

" Théorie qui attribuait à des cataclysmes les changements survenus à la surface de la Terre. "

Le *Hachette* est un peu plus explicite avec la définition suivante :

" Ancienne théorie selon laquelle les changements de faune et de flore se seraient faits brusquement à la faveur de catastrophes géologiques de très grande ampleur. *La théorie de l'évolutionnisme de Darwin s'opposait au catastrophisme.* "

Il y a fort à faire, on le voit, avant de faire reconnaître ces deux concepts au rang de théories scientifiques actuelles (ce qu'elles sont déjà, n'en déplaise à certains). D'une façon plus moderne et plus scientifique, on peut donner les définitions suivantes :

Catastrophisme : théorie scientifique qui étudie les causes et les conséquences astronomiques, géologiques, écologiques, biologiques, humaines et historiques de cataclysmes de grande ampleur qui ont eu lieu et qui pourraient encore avoir lieu sur la Terre.

Impactisme : théorie scientifique qui étudie l'ensemble des phénomènes liés à l'impact sur les planètes des astéroïdes et des comètes, mais aussi plus largement de tous les autres corps et particules venus du cosmos, ainsi que tous leurs effets annexes. L'impactisme terrestre n'est qu'un cas particulier, celui qui concerne notre planète.

En fait, ces définitions ne sont que des approximations acceptables. Si l'on entre plus dans le détail, on reconnaît deux sortes de catastrophisme et trois sortes d'impactisme.

On distingue, en toute logique, le catastrophisme d'origine cosmique, dû comme son nom l'indique à des cataclysmes dont l'origine est extérieure à la Terre, et le catastrophisme d'origine terrestre dû à des cataclysmes générés par notre planète elle-même pour des raisons diverses. Ce catastrophisme peut être cependant considéré comme astronomique dans la mesure où la

Terre est une planète parmi d'autres, à la fois un "système" et une planète vivante que nous privilégions simplement parce qu'elle est "notre" planète et que l'on sait qu'elle abrite la vie.

L'impactisme se divise en trois composantes différentes selon les objets concernés et les effets résultant de l'impact :

- l'impactisme **macroscopique** qui concerne les astéroïdes et les comètes et qui peut avoir des conséquences catastrophistes ;
- l'impactisme **microscopique** qui concerne les météorites et les météores et qui n'a pas de conséquences catastrophistes ;
- l'impactisme **invisible** qui concerne les rayonnements divers générés par les étoiles, dont le Soleil, et appelé impactisme **particulaire**, et aussi les gaz et les poussières d'origine cosmique qui rencontrent la Terre au cours de son périple dans le Système solaire et dans la Galaxie.

Enfin, il faut bien préciser qu'il peut y avoir impactisme sans qu'il y ait catastrophisme, et inversement qu'il peut y avoir catastrophisme (d'origine terrestre et maintenant d'origine humaine) sans qu'il y ait impactisme. Dans ce livre, il sera question principalement du catastrophisme comme corollaire de l'impactisme macroscopique.

Quelques sigles et symboles

Pour comprendre toutes les données de ce livre, le lecteur doit connaître les rudiments de l'astronomie (1) et la signification de quelques sigles et symboles utilisés. Les sciences ont toutes leur propre "jargon" qui se complexifie continuellement et s'enrichit de sigles, et celui-ci n'est pas toujours connu même des scientifiques des disciplines connexes.

La liste suivante et les quatre livres signalés en note (2/3/4/5) rappellent les sigles, les symboles et les définitions qu'il est nécessaire d'avoir en mémoire (si ce n'est pas le cas, le lecteur pourra toujours se référer de nouveau à cette liste en cours de lecture).

Sigles

AAA = *objets Aten-Apollo-Amor*. Ces trois grands groupes d'astéroïdes qui peuvent venir à proximité immédiate ou relative de la Terre constituent globalement les NEA. Tous ont un aspect astéroïdal, c'est-à-dire ponctuel, quel que soit le grossissement utilisé pour les observer, mais certains d'entre eux sont *d'origine* cométaire.

EGA = *Earth-Grazing Asteroid*, astéroïde qui frôle la Terre. On réserve ce terme pour les astéroïdes dont l'orbite s'approche à moins de 0,100 UA de l'orbite terrestre (soit 1/10 de la distance Terre-Soleil ou 15,0 MK).

NEA = *Near-Earth Asteroid*, astéroïde proche de la Terre. Ce terme plus général englobe tous les astéroïdes dont la distance périhélique q est inférieure à 1,30 UA.

NEC = *Near-Earth Comet*, comète périodique avec une période de révolution $P < 200$ ans et $q < 1,30$ UA.

NEO = *Near-Earth Object*, objet proche de la Terre. Ce terme générique englobe les NEA et les NEC.

PHA = *Potentially Hazardous Asteroid*, astéroïde potentiellement dangereux. Ce sont les NEA qui ont $H < 22,1$ et $D_m < 0,050$ UA (7,5 MK). $H = 22,0$ correspond à un diamètre moyen de 130 mètres pour un objet silicaté et peut concerner des objets entre 100 et 200 mètres selon le type physique et l'albédo. Les objets avec $H > 22,0$ ne sont pas considérés comme des PHA, leur énergie étant insuffisante pour causer des dégâts "sérieux" sur la Terre.

Symboles astronomiques

– *concernant les éléments orbitaux*

UA = unité astronomique = 149 597 870 km (149,6 millions de km en chiffres ronds). C'est l'unité de distance, égale au demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil, utilisée pour exprimer les distances dans le Système solaire. 1 année lumière = 63 241 UA.

a = demi-grand axe d'une orbite. C'est la distance moyenne en UA d'un astre (planète, astéroïde, comète) au Soleil.

e = excentricité d'une orbite planétaire. Elle est comprise entre 0 (orbite circulaire) et 1 (orbite parabolique). Une orbite hyperbolique aurait $e > 1,0$.

i = inclinaison, en degrés, d'une orbite sur le plan de l'écliptique. Une orbite rétrograde a i compris entre 90 et 180°.

q = distance périhélique en UA = plus courte distance au Soleil.

Q = distance aphélique en UA = plus grande distance au Soleil.

P = période de révolution d'un astre, en années.

ω = argument du périhélie, en degrés.

Ω = longitude du nœud ascendant, en degrés.

π = longitude du périhélie ($\pi = \omega + \Omega$).

– *autres symboles astronomiques*

D_m = distance minimale d'un astre à l'orbite terrestre (ou à une autre orbite planétaire) en UA. L'équivalent anglais utilisé dans de nombreuses listes est le *moid* (minimum orbital intersection distance).

H = magnitude absolue d'un astéroïde, fonction du diamètre moyen et du type physique.

km/s = kilomètres par seconde, unité de vitesse pour les astres du Système solaire.

MK = millions de kilomètres, unité utilisée pour les distances kilométriques dans le Système solaire intérieur.

Autres symboles scientifiques

E_c = énergie cinétique. Celle d'un impact se calcule avec la formule classique $E_c = \frac{1}{2} mv^2$, ce qui signifie qu'elle est égale au demi-produit de la masse de l'impacteur par le carré de sa vitesse d'impact.

J = joule. Unité d'énergie utilisée dans le système international (SI) à la place de l'erg (qui était utilisé dans l'ancien système CGS). 1 joule = 10^7 ergs = 10 millions d'ergs. 1 calorie = 4,186 joules.

MA = million d'années.

MT = mégatonne. 1 mégatonne (1 MT) = 1 million de tonnes = 1000 kilotonnes.

TNT = abréviation de trinitrotoluène. La mégatonne de TNT (dont l'énergie = $4,2 \times 10^{15}$ J) est l'unité utilisée pour les comparaisons énergétiques avec des événements terrestres ou d'origine cosmique.

Système de notes

J'ai regroupé à la fin de chaque chapitre, sous le titre générique de **notes**, trois sortes de renseignements :

1. des notes complémentaires sur certains points de détail qui alourdiraient le texte principal si elles y étaient intégrées ; le lecteur peut se dispenser de les lire mais elles sont utiles et souvent instructives ;
2. les références complètes des livres, revues et articles que j'ai utilisés pour la rédaction du texte principal, ainsi que celles des citations ;
3. les références d'autres livres, revues et articles qui peuvent servir de lecture additionnelle pour le lecteur exigeant qui veut en savoir plus sur certains points particuliers ; il est évident que certains sujets ne sont que survolés ici et que les documents cités permettront d'enrichir sérieusement les connaissances du lecteur.

Notes de l'avant-propos

1. P.-Y. Bély, C. Christian et J.-R. Roy, *250 réponses à vos questions sur l'astronomie*, Gerfaut, 2008. Un excellent livre de vulgarisation, très bien illustré, qui répond à de nombreuses questions que le lecteur cultivé se pose sur l'astronomie.
2. Ph. de La Cotardière, *Dictionnaire de l'astronomie* (Larousse, 1996). Le lecteur trouvera dans ce livre de référence de nombreux renseignements sur l'astronomie et son vocabulaire.
3. I. Ridpath (ed.), *Oxford dictionary of astronomy* (Oxford University Press, 2007). Un excellent dictionnaire collectif d'astronomie de plus de 500 pages et qui comprend 4200 entrées.

4. J. Hermann, *Atlas de l'astronomie* (Livre de Poche, La Pochothèque, 1995). Atlas très visuel et assez complet qui comprend une liste de symboles et d'abréviations concernant l'astronomie.

5. H. Breuer, *Atlas de la physique* (Livre de Poche, La Pochothèque, 1997). Comme le précédent, cet atlas est très visuel et complet. Il y a beaucoup à apprendre pour les non-spécialistes.

Couverture

Cette illustration, due au dessinateur Sunu Fecit, date de 1857. Elle a été reprise par un grand nombre d'auteurs depuis plus de 150 ans. C'est la partie principale d'une carte postale, intitulée " *Actualités Astrologiques* " et sous-titrée " *Apparition Foudroyante et Désastreuse de la Comète du 13 Juin 1857* ", destinée à ridiculiser certains astronomes de l'époque qui avaient annoncé la venue d'une grande comète qui risquait de heurter la Terre.

Depuis une dizaine d'années, on attendait le retour de la grande comète de 1556, dite *comète de Charles Quint* (et qui l'avait poussé à abdiquer). Certains astronomes croyaient alors à une identité probable avec la grande comète observée en 1264, et donc à une période de révolution légèrement inférieure à 300 ans. Des prophètes en avaient profité pour annoncer la fin du monde. En fait, la comète de 1857 était imaginaire puisque les comètes de 1264 et 1556 étaient deux comètes différentes.

Les pages 2 et 3 de couverture reprennent une illustration célèbre, utilisée par Camille Flammarion dans plusieurs revues à l'époque de la parution de son livre *La fin du monde*, qui montre la destruction de la Terre par une comète. Paris est submergée par un tsunami.

Première page

Depuis l'Antiquité et durant tout le Moyen Age, les comètes ont toujours fait peur aux hommes. Le dessin de la première page montre une grande comète au Moyen Age qui a terrorisé la foule inculte et peureuse, persuadée que c'est Dieu qui lui envoie une messagère malveillante pour la punir, ou tout au moins pour la mettre en garde. A quatre pattes, elle implore Sa clémence, Son pardon et accepte Son pouvoir, et par délégation celui de la sacro-sainte religion qui Le représente sur Terre et qui règne donc en maîtresse absolue. La parole des savants est inaudible, la science immobile. L'obscurantisme est roi...

INTRODUCTION

LE RENOUVEAU DES IDÉES CATASTROPHISTES

Réhabilitation d'un concept scientifique

On peut vraiment se demander pourquoi cette réalité incontournable qu'est le catastrophisme, qu'il soit d'origine cosmique ou d'origine purement terrestre, n'a émergé seulement que dans le dernier quart du XX^e siècle, en dépit de la réticence de chercheurs trop conservateurs.

Il suffit de se rappeler deux précédents, tristement célèbres, pour mieux saisir les raisons de ce retard incompréhensible pour un esprit rationnel. Il y a seulement 250 ans, les savants, parmi lesquels l'illustre Lavoisier (1743-1794), refusaient systématiquement d'admettre l'origine cosmique des météorites (1), contre toute logique et malgré des preuves irréfutables accumulées depuis plus de 3000 ans. Il y a moins de 70 ans, l'origine cosmique du Meteor Crater de l'Arizona était elle aussi contestée, niée même, par une majorité de "spécialistes" et les astroblèmes étaient systématiquement ignorés. On se demande toujours pourquoi ces "verrous psychologiques" ont mis tant de temps à sauter. C'est exactement la même chose avec l'impactisme et le catastrophisme.

Cependant, deux générations de nouveaux chercheurs ont suffi pour balayer les doutes et surtout pour laisser la science "respirer", chercher et trouver les preuves indispensables. Après les preuves, on passe aux causes et aux conséquences, et tout s'éclaire enfin. La révolution technologique aidant (l'apport de l'informatique, des satellites et des instruments modernes surtout), c'est la science elle-même qui a fait progressivement sa révolution, avec le renouvellement des chercheurs. On sait que les anciens ne veulent pas ou ne peuvent pas remettre en question leurs certitudes. Du coup, le catastrophisme, qui avait une image de marque assez désastreuse depuis Georges Cuvier (1769-1832) et ses disciples, qui étaient catastrophistes mais surtout *fixistes* (2), c'est-à-dire en fait *créationnistes*, a refait surface progressivement comme un concept scientifique régénéré et tout à fait crédible (crédible tout simplement car reflet indiscutable de la réalité).

Je précise une chose pour éviter toute ambiguïté malvenue : ce livre est tout le contraire d'une étude procréationniste. A mes yeux, comme à ceux d'une majorité de chercheurs actuels, le catastrophisme scientifique et son ersatz créationniste sont totalement antinomiques, même si le terme générique de catastrophisme, qui n'est pas dû à Cuvier d'ailleurs qui parlait seulement de "*révolutions du globe*", mais au géologue et philosophe anglais William Whewell (1794-1866), peut paraître effectivement un peu ambigu, compte

tenu de son histoire douteuse. Mais comme il reste utilisé (à juste titre selon moi), je l'utilise aussi, mais sous son aspect uniquement scientifique (sauf précision expresse). Je participe donc, à mon niveau et avec d'autres, à sa réhabilitation que l'on veut croire définitive.

La science fait sa révolution permanente

Depuis soixante ans, les connaissances scientifiques ont fait un bond absolument extraordinaire et de nombreux nouveaux concepts ont fait leur apparition, imposés par les observations et les analyses des données toujours plus nombreuses et plus précises. Pour certaines sciences on peut vraiment parler de révolution. Des disciplines aussi diverses que l'astronomie, la physique, l'astrophysique, la cosmochimie, la géophysique, la géologie, la paléontologie, la biologie et d'autres encore se sont trouvées régénérées.

L'exploration spatiale, qui était une chimère au début des années 1950, a connu une réussite impressionnante et aujourd'hui tous ces merveilleux clichés des planètes voisines, envoyés par les sondes spatiales, nous sont familiers et figurent dans tous les livres de sciences. L'informatique, a elle aussi connu un développement incroyable, permettant d'effectuer des calculs de plus en plus complexes et des simulations souvent décisives pour tester les différents modèles en concurrence. Le simple astronome amateur peut faire aujourd'hui ses propres calculs et apporter sa modeste pierre, surtout dans les domaines délaissés par les professionnels, comme la chasse aux comètes et l'observation des étoiles doubles et variables. Enfin, toutes les sciences ont vu leur instrumentation se perfectionner dans des proportions inimaginables et les ingénieurs se sont surpassés pour inventer de nouveaux outils, toujours plus perfectionnés et plus efficaces, qui repoussent les limites de l'impossible.

Les astronomes et les astrophysiciens ont été les témoins de cataclysmes cosmiques très divers, comme le volcanisme hallucinant qui transforme la surface de Io, le satellite de Jupiter, en quelques siècles seulement, la fameuse explosion de la supernova du 24 février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan et enfin, et peut-être surtout, la fantastique collision de la vingtaine de fragments de la comète brisée Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994 (3), qui d'après les statisticiens n'avait pas une chance sur cent milliards de se produire. Et pourtant ! La nature n'a que faire des statistiques humaines... Ces trois cataclysmes ont bien montré que nous vivons dans un Univers violent en permanence, dans lequel le cataclysme est la règle et non l'exception. Le troisième a rappelé que l'impactisme planétaire est une réalité de toujours et non pas seulement du passé.

Obligatoirement, et en toute logique, les théories catastrophistes, qu'elles soient cosmiques ou terrestres, ont bénéficié d'un regain de faveur, de crédibilité. On connaissait par l'observation les astéroïdes et les comètes qui frôlent la Terre, on a identifié les cratères qu'ils forment sur notre planète, les astroblèmes, grâce aux satellites et sur le terrain par la signature

caractéristique du métamorphisme de choc. La Terre elle-même est une planète violente en permanence, et on a pu expliciter le volcanisme et les tremblements de terre avec précision, grâce notamment à la tectonique des plaques.

Enfin, la décennie 1980 a vu une extraordinaire compétition scientifique entre les différentes équipes de chercheurs de diverses spécialités pour résoudre le fameux problème de l'iridium surabondant dans la fine couche géologique séparant le crétacé du tertiaire (la couche K/T), mis en lumière par les deux Alvarez et leurs collègues (4). Réussite complète et pour tous : astronomes, géologues, volcanologues et aussi paléontologues sont d'accord aujourd'hui pour dire qu'un astéroïde (ou une comète) s'est écrasé(e) sur la Terre il y a 65 millions d'années. Les dinosaures et l'astrolème mexicain de Chicxulub ont un point commun, totalement insoupçonné jadis : les uns ont été détruits alors que l'autre a été formé par le même objet. Les conséquences de cette collision cosmique sont énormes, presque démesurées, compte tenu du diamètre (10 km environ) de l'objet responsable, comme je l'expliquerai en détail aux chapitres 12 et 15.

On le sait depuis toujours : pour exister et être crédible, une théorie a impérativement besoin de l'appui d'observations incontestables. La fin du XX^e siècle aura été particulièrement bénéfique pour les catastrophistes des différentes sciences. Tous, chacun dans sa "sphère", ont marqué des points décisifs. C'est cette histoire que je raconte dans les différents chapitres de ce livre qui peuvent être lus séparément. Comprendre ce qui s'est réellement passé à chacune des grandes étapes de la Terre et de la vie qu'elle abrite, c'est la quête sans cesse renouvelée des scientifiques. Le catastrophisme, même s'il n'est pas seul en cause, s'annonce comme un moteur essentiel de l'évolution de la matière et aussi de celle du monde vivant. Une réalité dure à admettre pour beaucoup de chercheurs de certaines disciplines qui connaissent mal, ou pas du tout parfois, les données astronomiques du problème.

De la science-fiction à la réalité de demain

Le film "catastrophe" américain *Meteor*, sorti sur les écrans en 1979 et tiré du roman du même nom (5), a popularisé il y a déjà plus de trente ans le thème d'une Terre sous la menace de corps célestes susceptibles de rayer la vie, sinon totalement, du moins partiellement, sur notre planète. Le ciel a toujours fait peur. Il effrayait déjà nos ancêtres, et pas sans raisons, nous le verrons au chapitre 19, mais aussi plus récemment, dans l'Antiquité, au Moyen Age et au cours des siècles suivants.

De nos jours, depuis la découverte d'astéroïdes comme Hermes, Asclepius et Toutatis qui ont frôlé la Terre au XX^e siècle, et encore plus depuis la découverte en 2004 d'Apophis qui va la frôler en avril 2029, on sait qu'un impact reste toujours possible. L'armée américaine, elle-même, consciente que le danger est réel et garante de la sécurité des populations, a pris le problème en main au début des années 1990 pour traquer "l'ennemi

extérieur" et envisager tous les moyens nécessaires pour parer à un impact d'envergure annoncé. Annoncé, car les astronomes peuvent parfaitement être pris au dépourvu avec un objet menaçant être repéré trop tard, on l'a bien vu en 1908 avec le cataclysme de la Toungouska.

En 1979, le film *Meteor* a eu un excellent effet pédagogique auprès du public qui ignorait souvent tout du problème et souvent ne voulait rien en connaître. La vedette de ce film est un météore (en fait un astéroïde) de 7 km de diamètre qui fonce dans l'espace à 40 000 km à l'heure, soit à la vitesse de 11 km/s (ce qui n'a rien d'excessif, la vitesse moyenne acceptée pour ce genre d'objets étant de 20 km/s) et qui a pour cible la Terre. Sa force de frappe, prodigieuse, équivaut à environ 2 500 000 mégatonnes de TNT. Ce météore annonciateur de l'Apocalypse est précédé sur son orbite par une nuée d'objets plus petits (des météorites, de plusieurs dizaines de mètres pour certaines) qui causent déjà toutes sortes de misères et d'importants dégâts sur notre planète (impact en Sibérie, destruction d'un village dans les Alpes autrichiennes, raz de marée de 35 mètres de haut qui dévaste Hong Kong suite à un impact dans le Pacifique, destruction de New York (6)). Heureusement, les deux super-grands de l'époque (États-Unis et URSS), d'accord pour une fois, envoient leurs fusées nucléaires stationnées en orbite autour de la Terre vers le gros météore en un tir groupé, libérant assez d'énergie pour le dévier sur une orbite sans danger pour notre planète. La fin du monde est ainsi repoussée à plus tard, et les populations terrorisées peuvent se remettre de leurs émotions et reprendre leur vie normale.

Plus récemment, en 1993, le célèbre auteur de science-fiction britannique Arthur Clarke (1917-2008) a écrit un passionnant petit livre : *Le marteau de Dieu* (7), dans lequel il raconte l'histoire d'un astéroïde de 1,5 km de diamètre moyen, baptisé *Kali*, pour la déesse de la mort et de la destruction dans la mythologie hindoue, qui fonce vers la Terre et que les hommes du XXII^e siècle essaient de dévier sur une orbite sans danger pour notre planète. Comme le raconte Clarke dans son roman :

" Les hommes ont tout prévu... sauf l'imprévisible ! " (8)

En exergue de son livre, il dit également ceci :

" Tous les événements situés dans le passé se sont effectivement produits aux lieux et époques indiqués ; tous ceux situés dans le futur se produiront peut-être. Un seul est inéluctable : tôt ou tard nous rencontrerons Kali. " (9)

Kali, pour Clarke, c'est l'objet cosmique d'envergure qui obligatoirement se retrouvera dans les siècles à venir sur une orbite de collision avec la Terre et la percutera si l'homme n'intervient pas. C'est déjà lui qui, en 1973, dans son célèbre roman *Rendez-vous avec Rama* (10), avait imaginé la création d'un système international de surveillance, nommé *Spaceguard*, destiné à repérer tout astéroïde ou comète s'approchant un peu trop près de la Terre ou même tout vaisseau interstellaire pénétrant dans le Système solaire.

Clarke a été entendu et *Spaceguard* existe aujourd'hui, c'est un réseau de télescopes automatiques spécialisés dans la détection d'objets célestes dangereux, s'avérant indispensable pour recenser tous les astéroïdes potentiellement dangereux pour la Terre, objets dont on ne connaît encore que quelques pourcents du total.

Tous ceux qui ont vu *Meteor*, ou plus récemment *Deep Impact* ou *Armageddon*, les deux grands films parus sur le même sujet en 1998, ou qui ont lu *Le marteau de Dieu*, ou un autre livre du même genre, se sont posé ces questions : " *Une telle collision est-elle possible dans la réalité ? avec quelles conséquences principales ?* ". Depuis le début des années 1950, la théorie de l'impactisme terrestre répond à ces questions. Aujourd'hui, on sait sans aucune équivoque que la réponse est *oui*. Cette éventualité est non seulement possible, mais certaine à l'échelle astronomique.

Arthur Clarke, bien connu pour son sens du raccourci, a résumé en une seule phrase la conséquence essentielle du cataclysme d'origine cosmique qui a eu lieu il y a 65 MA et auquel est consacré le chapitre 12 :

" L'horloge de l'évolution remise à zéro, le compte à rebours menant à l'homme pouvait commencer. " (11)

J'étudierai dans ce livre les différents aspects et les données chiffrées du problème, et le lecteur non scientifique, peu au courant préalablement et sans idées préconçues, ne pourra qu'être étonné par les résultats de cette enquête. Une chose est sûre : à la lumière de tous chiffres actuellement disponibles, le pire paraît plus probable qu'il y a trente ans. *Le marteau de Dieu* ne fait que raconter la réalité de demain.

Des preuves d'abord astronomiques et géologiques

Deux approches totalement différentes ont permis de se rendre compte du bien-fondé de la théorie de l'impactisme terrestre. D'abord, une approche **astronomique**. Depuis la fin du XIX^e siècle, on a découvert plus de 5000 petits astéroïdes (des EGA avec $D_m < 0,100$ UA) qui peuvent s'approcher fortement de la Terre. Certains sont d'origine planétaire, d'autres sont des noyaux de comètes mortes ou en sommeil. On sait maintenant d'une manière formelle et définitive qu'il s'agit là du "matériel", constamment renouvelé, qui frappe et meurtrit notre planète depuis 4,6 milliards d'années. Dans certaines circonstances, beaucoup plus rares (en 2011 moins de 200 NEC différentes sont répertoriées), ce sont des comètes actives qui peuvent entrer en collision avec la Terre.

Il existe aussi un autre impactisme, totalement différent de l'impactisme "macroscopique" résultant des impacts d'astéroïdes et de comètes, que l'on nomme l'impactisme invisible ou particulière qui concerne les divers rayonnements et les poussières cosmiques et qui a un rôle très important

sur l'évolution des formes vivantes. Je l'étudierai en détail au chapitre 8. Il est principalement le champ d'étude des physiciens et des astrophysiciens.

La seconde approche est **terrestre**. Dès 1893, on a suggéré une origine cosmique pour le fameux Meteor Crater de l'Arizona, hypothèse admise définitivement par tous en 1953 seulement. En 1908, avec le cataclysme de la Toungouska, en Sibérie, on a eu un bon exemple de ce qui se passe lorsqu'un petit astéroïde explose dans l'atmosphère, avec des dégâts au sol qui peuvent être impressionnants. Mais c'est surtout à partir de 1950, la découverte des premiers cratères météoritiques fossiles, les astroblèmes, sur le territoire canadien qui a démontré la réalité de l'impactisme terrestre. Les conséquences des impacts ont été longtemps incroyablement sous-estimées, quasiment jusqu'au début des années 1980, et elles réservent de belles surprises. L'histoire de l'impact qui a mis fin au règne des dinosaures a été largement popularisée, mais ce n'est qu'un exemple parmi d'autres.

Les impacts importants du passé ont libéré des énergies considérables, largement supérieures à celles engendrées par les grands cataclysmes purement terrestres, comme les éruptions volcaniques et les séismes. Ce sont les événements les plus cataclysmiques qui peuvent concerner notre planète et la vie qu'elle abrite. Si l'homme ne se détruit pas lui-même d'ici quelques milliers d'années, il sera peut-être le témoin, s'il ne détecte pas suffisamment tôt le projectile se précipitant vers la Terre, d'un impact important et de ses conséquences.

Rechercher les causes de l'impactisme historique et protohistorique

Dans le chapitre 1, je montrerai par le rappel de quelques textes et légendes anciens que l'idée de la Terre bombardée est loin d'être nouvelle. Notre planète a déjà été meurtrie dans un passé historique et protohistorique par des objets cosmiques qui ont effrayé les Anciens et contribué à la mise en place de concepts universels, comme le Chaos primitif, l'effondrement périodique de la voûte céleste et la rupture des "piliers du monde".

Pendant longtemps il fut de bon ton de se gausser de ces fables inventées par des ancêtres considérés comme quasi débiles, avec leur Terre plate et leurs dieux malveillants, mais les choses ont changé. Ce sera l'apanage des chercheurs de la prochaine génération d'apporter, sinon un point final, tout au moins une explication scientifique incontestable sur le pourquoi de certaines de ces légendes.

On a longtemps cru qu'il ne serait pas possible d'apporter des preuves à ce qui s'est réellement passé au cours de la protohistoire et de l'histoire ancienne. Eh bien si ! Depuis 1982, on commence à y voir plus clair. Ces preuves seront astronomiques mais multiformes, comme je l'expliquerai en détail dans des chapitres différents. Dans le chapitre 6, je montrerai que beaucoup d'astéroïdes ont des orbites semblables, qui dénotent probablement une origine commune pour de nombreux petits objets. Dans le

chapitre 7, je parlerai de la comète P/Encke, une comète périodique à courte période en fin de vie active et de son association avec un important courant de météores, celui des *bêta-Taurides*. Je parlerai également d'objets connus depuis 1977 seulement : les astéroïdes extérieurs d'origine cométaire, connus sous le nom générique de *centaures*, et aussi de *la ceinture de Kuiper* et du *nuage de Oort* dont ils sont issus.

Quel rapport entre tous ces objets et les catastrophes cosmiques qui ont eu lieu dans l'Antiquité et la protohistoire ? C'est là que l'histoire devient extraordinaire, et même quasiment incroyable. Sans entrer dès maintenant dans le détail, que j'appréhenderai au fur et à mesure de certains chapitres, il faut rappeler que des objets de la ceinture de Kuiper, qui peuvent être soit des comètes, soit des astéroïdes, soit des objets mixtes astéroïdes-comètes, et dont le diamètre peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres, sont chassés de cette ceinture (comprise entre 38 et 100 UA) à la suite de perturbations et sont injectés dans la partie du Système solaire intérieure à Neptune, la huitième planète principale. Ils deviennent alors des *centaures*, comme Chiron ou Pholus, objets à orbite chaotique dont l'espérance de vie sur ce genre d'orbites instables est très faible à l'échelle astronomique.

Suite à de nouvelles perturbations, ils peuvent être injectés dans un deuxième temps sur des orbites à courte période et très forte excentricité. Ces gros objets peuvent être alors brisés en une multitude de fragments, quelques gros, de nombreux moyens, d'innombrables petits et une infinité de poussières, consécutivement à une forte approche à Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune, mais peut-être aussi consécutivement à une très forte approche à Mars, la Terre, Vénus et même Mercure.

C'est très probablement ce qui s'est passé, à une époque qui reste à définir avec une des planètes qui reste elle aussi à déterminer, pour un gros objet, mi-astéroïde mi-comète : Hephaistos. Cet objet mixte a généré après fragmentation plusieurs centaines de comètes, parmi lesquelles P/Encke, des milliers de mini-comètes aujourd'hui éteintes (mortes ou en sommeil pour certaines) et de très nombreux astéroïdes associés. Parmi tous ces débris hétéroclites par leur taille, leur forme et leur composition, certains sont déjà connus comme Hephaistos (le plus gros objet Apollo recensé avec un diamètre de 10 km, et qui donne logiquement son nom au géniteur de la famille) et Oljato dont j'aurai souvent à reparler, ainsi que l'essaim de poussières des *bêta-Taurides*. Pour rajouter à l'extraordinaire, je signale que de nombreux astronomes pensent que l'objet de la Toungouska, connu maintenant sous le nom de Ogdy, était lui aussi un de ces fragments associés à P/Encke, et donc également à leur géniteur commun.

C'est le calcul astronomique, via l'ordinateur, outil et associé indispensable de l'astronome, qui a montré que P/Encke, Hephaistos, Oljato et beaucoup d'autres NEA connus et à découvrir *ne formaient qu'un seul objet il y a seulement quelques dizaines de milliers d'années*. Chacun de ces objets aujourd'hui autonomes subit ses propres perturbations et s'éloigne inexorablement des autres, mais l'origine commune ne semble pas faire de

doute. On comprend déjà mieux la suite, même si les points d'ombre restent nombreux pour le moment. Hephaistos, ou l'un de ses premiers fragments, car la désintégration a pu avoir lieu en plusieurs étapes successives (et c'est probablement ce qui s'est passé, vu les différences constatées dans les inclinaisons et les excentricités de certains résidus), est venu dans la proche banlieue de la Terre, peut-être à plusieurs reprises, avant la désintégration finale. Il paraît évident que plusieurs de ces fragments ont déjà heurté la Terre, car les deux orbites se coupaient ou étaient très voisines. Encore de nos jours, l'essaim des *bêta-Taurides* coupe la Terre fin juin et nous distille régulièrement chaque année une infime partie de sa matière sous forme de météores, et parfois comme en 1908, il nous octroie un morceau plus volumineux pour montrer que l'histoire n'est pas vraiment finie et que nous devons rester vigilants.

Hypothèse farfelue que celle de Hephaistos, qui se met lentement mais sûrement en place ? Sans doute pas. Plus d'une centaine d'astéroïdes de la même famille sont déjà connus, et quand l'étude physique des différents fragments cométaires et planétaires pourra être entreprise, et certaines anomalies expliquées, une solution acceptable se dégagera d'elle-même, mettant fin à une très longue période de "ténèbres" (pas mythologiques ceux-là, mais bien historiques et scientifiques !).

Une chose est sûre en tout cas : l'histoire cosmique des hommes est beaucoup plus complexe qu'on le croyait, et toutes ces légendes et ces concepts qui ont toujours paru absurdes méritent d'être revisités à la lumière des connaissances actuelles, même s'il ne faut pas leur accorder une importance démesurée.

Notre époque n'est qu'un simple jalon dans la longue histoire des hommes et dans la connaissance qu'ils en ont, et chaque génération s'appuie sur les acquis de la précédente et prépare ceux de la suivante. Une relecture de Sénèque (2 av. J.-C.-65) et de ses *Questions naturelles* (12) me servira de conclusion. Ces phrases pleines de sagesse écrites au crépuscule de sa vie, entre les années 62 et 65 de notre ère, sont toujours d'actualité.

" Soyons satisfaits de ce que l'on a déjà découvert et permettons à nos descendants d'apporter aussi leur contribution à la connaissance de la vérité...

Ne nous étonnons d'ailleurs pas que l'on amène si lentement à la lumière ce qui est caché si profondément...

La génération qui vient saura beaucoup de choses qui nous sont inconnues. Bien des découvertes sont réservées aux siècles futurs, à des âges où tout souvenir de nous sera effacé. Le monde serait une pauvre petite chose, si tous les temps à venir n'y trouvaient matière à leurs recherches. "

Notes

1. M.-A. Combes, *La Terre bombardée* (France-Empire, 1982). Ce livre a eu deux versions ultérieures : la version 2 en 1998 et la version 3 en 2007 qui sont visibles (et téléchargeables) sur mon site *La menace du ciel*.
2. C. Grimoult, *Évolutionnisme et fixisme en France* (CNRS Éditions, 1998).
3. L'impact de la vingtaine de fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994 a été un événement scientifique d'une importance et d'un intérêt considérable, l'un des plus importants du XX^e siècle. J'en parle en détail aux chapitres 4 et 5.
4. Ch. Frankel, *La mort des dinosaures : l'hypothèse cosmique* (Masson, 1996).
5. E. North et F. Coen, *Meteor* (Belfond, 1980). Titre original : *Meteor* (1979). D'après le scénario de S. Mann et E. North, sur une histoire de E. North.
6. Ces catastrophes préliminaires n'ont pas été choisies au hasard par les scénaristes, excepté la dernière. Elles correspondent à des cataclysmes ayant eu lieu, ou soupçonnés avoir eu lieu, dans le passé (voir chapitre 19).
7. A.C. Clarke, *Le marteau de Dieu* (J'ai lu, S-F 3973, 1995). Titre original : *The hammer of God* (1993). Arthur Clarke connaît parfaitement le sujet. Kali est un astéroïde cométaire à orbite rétrograde (et donc à très grande vitesse) qui redevient actif en pénétrant à l'intérieur de l'orbite de Mars. Des forces *non gravitationnelles* de dernière heure rendent sa course imprévisible. Clarke sait entretenir le suspense.
8. *Le marteau de Dieu*, citation p. 4 de couverture.
9. *Le marteau de Dieu*, citation p. 5.
10. A.C. Clarke, *Rendez-vous avec Rama* (Robert Laffont, 1975). Titre original : *Rendez-vous with Rama* (1973). Un classique de la science-fiction et l'un des meilleurs romans d'Arthur Clarke.
11. *Le marteau de Dieu*, citation p. 30.
12. Sénèque, *Questions naturelles* (Les Belles Lettres, 1930 ; traduction et annotations par P. Oltramare). Cette édition très remarquable du livre de Sénèque fut publiée sous le patronage de l'Association Guillaume Budé. Le livre VII consacré aux comètes (pp. 300-336) est particulièrement intéressant.

CHAPITRE PREMIER

LE CATASTROPHISME DANS L'ANTIQUITÉ

Le souvenir obsessionnel de grands cataclysmes

L'idée que la Terre a souvent été victime de catastrophes de grande ampleur, d'origine cosmique ou terrestre, n'est pas nouvelle, loin de là. C'était un point commun à toutes les mythologies des peuples anciens, aussi loin que l'on remonte dans le temps (quasiment depuis l'an 10000 avec la grande déglaciation, point de départ d'une transformation complète de la géographie côtière), même si le nombre et les causes de ces cataclysmes variaient d'une mythologie à l'autre. Des concepts comme le *Chaos*, le *Déluge* ou la *chute du ciel* faisaient partie de leur histoire et de leur imaginaire. J'étudierai en détail au chapitre 18 ces grands cataclysmes terrestres et au chapitre 19 les cataclysmes cosmiques que l'on a pu recenser.

Dans ce chapitre, il est question de certains aspects *historiques* et *mythologiques* du problème. Ce sera l'occasion de retrouver quelques grands personnages de l'Antiquité qui s'intéressaient au passé et à l'avenir de la Terre, désirant percer les secrets de l'un et de l'autre, et de rappeler aussi quelques textes représentatifs explicites, textes qui ont eu la chance de parvenir jusqu'à nous, contrairement à d'autres, beaucoup plus nombreux, qui sont malheureusement perdus.

Il faut noter que la notion même de catastrophisme a évolué avec le temps, au fur et à mesure des observations et des découvertes des Anciens. Et il ne faut jamais oublier que jusqu'à Anaximandre (610-547), personne n'osa envisager sérieusement une Terre autrement que plate, et jusqu'à Aristarque de Samos (310-230) autrement que le centre du monde.

Très longtemps, de la préhistoire au Néolithique, le catastrophisme fut uniquement *mythologique* avant de devenir très progressivement *astrologique* et *cyclique* quand les Anciens comprirent que la Lune et les planètes, les astres errants, reprenaient indéfiniment les mêmes positions relatives dans le ciel. On se souvient que les Grecs, enthousiasmés par la découverte du cycle de Méton (v. 430 av. J.-C.), période qui ramène les nouvelles lunes le même jour tous les dix-neuf ans, firent graver cette découverte en caractères d'or (1).

On ne peut que regretter le peu de textes disponibles pour se faire une idée plus précise de ces catastrophes du passé, et surtout le fait que certains textes qui ont existé ont été détruits d'une manière imbécile et criminelle dans l'incendie des grandes bibliothèques chargées de les préserver.

Le catastrophisme mythologique : des dieux et des légendes

Je vais d'abord rappeler quelques légendes prises dans les mythologies du monde entier, pour bien montrer le caractère universel des bouleversements et catastrophes qui ont meurtri les Anciens. J'ai été obligé, bien sûr, de choisir parmi de nombreux textes (anciens, mais aussi modernes), et ceux-ci ne sont que des textes parmi d'autres.

Mythologie aztèque : les quatre soleils

Les anciens Aztèques racontaient que quatre *mondes*, ou quatre *soleils*, ont précédé le nôtre et qu'ils furent détruits par des cataclysmes de grande ampleur.

" Quatre fois le monde fut détruit. La première fois, le soleil s'éteignit et un froid mortel s'abattit sur la terre. Seul un couple humain put s'échapper et perpétuer l'espèce. La deuxième fois, un vent magique souffla de l'ouest, et tous les hommes, sauf deux encore, furent transformés en singes. La troisième fois, ce fut le feu qui accomplit l'œuvre de destruction. Les rayons d'un soleil gigantesque firent flamber la planète, tandis que les coups de foudre répondaient aux rugissements des volcans déchaînés. Il y eut deux rescapés, et l'homme ne mourut pas. Enfin vint le quatrième cataclysme, celui de l'eau. Le ciel tomba sur la terre et ce fut le déluge. Tout disparut sous les flots, étoiles, soleils et planètes. L'obscurité s'étendit sur l'abîme. Mais l'homme survivait toujours. " (2)

Les quatre destructions quasi totales du monde furent successivement le fait du froid, du vent, du feu et de l'eau. On retrouve ces quatre agents de destruction dans de nombreuses autres mythologies. Ces quatre *âges du monde* des Aztèques s'étalent en fait sur plusieurs milliers d'années. Ils sont équivalents à ceux des autres peuples d'Amérique du Nord, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud.

Mythologie chinoise : Kong-Kong, le dragon

En Chine, les textes anciens font allusion à de sérieux cataclysmes qui se seraient produits à l'époque des cinq empereurs semi-légendaires (Huangdi, Zhuan Xu, Diku, Yao et Shun) que l'on situe en général au III^e millénaire avant J.-C. Je reparlerai au chapitre 19 de ces cataclysmes, car ils ont eu, semble-t-il, une origine cosmique.

" Jadis, Kong-Kong disputa l'empire à Tchouan-hiu et, dans sa rage, donna un coup de corne au mont Pou-tcheou. La colonne qui soutenait le Ciel (au coin N.-O.) fut cassée, l'amarre de la Terre (au coin S.-E.) fut rompue, le Ciel se pencha vers le nord-

ouest et c'est pourquoi le soleil, la lune, les étoiles se déplacent dans cette direction. La Terre eut une ouverture au sud-est, et c'est ainsi que les eaux, les rivières, le sol, la poussière se précipitent dans cette direction. " (3)

En Chine, on parle donc d'une rupture de l'axe du monde et la Terre se serait "penchée" vers le nord-ouest.

Mythologie égyptienne : Sekhmet, la lionne en furie

Dans la mythologie égyptienne, Sekhmet était le nom de la déesse de la guerre, représentée généralement comme une lionne ou comme une femme à tête de lionne. Elle devenait parfois aussi l'œil de Rê, le dieu-soleil, et était chargée de détruire ses ennemis. Elle répandait les épidémies sur toute l'Égypte quand le dieu voulait se venger. Une légende liée à un drame cosmique (qui n'est autre que celui de la fin du XIII^e siècle av. J.-C.) racontait que sur les ordres de Rê, elle se jeta sur les hommes révoltés avec une telle frénésie et une telle méchanceté que le dieu-soleil redoutant l'extermination de la race humaine dut lui demander d'arrêter le carnage. Comme elle refusait obstinément d'obtempérer, il dut employer un curieux stratagème, une ruse comme seuls les dieux en avaient le secret (4) :

" Rê fit préparer des cruches de "didi", liquide colorant en rouge, qui sont mélangées à de la bière. Pendant toute la nuit, alors que Sekhmet dort, la bière rouge est versée sur toute la terre d'Égypte. A son lever, la déesse pense voir un fleuve de sang dû au massacre des hommes. Elle se mire dedans, puis commence à laper. Bientôt totalement ivre, elle oublie sa mission et s'en retourne auprès des dieux en épargnant les survivants. "

On remarque dans cette légende le fait souvent noté que le monde prit une couleur rouge à l'occasion de ce cataclysme, du fait de la pigmentation de la matière abandonnée dans l'atmosphère terrestre par la désintégration et l'émiettement du corps céleste.

Il semblerait que les Égyptiens aient retenu le jour de l'année du début du grand cataclysme : le *12 Tybi*, soit presque obligatoirement une date correspondant à la fin octobre ou au début novembre de notre calendrier moderne (5), si le cataclysme a bien eu lieu au XIII^e siècle avant J.-C. C'est une précision très importante que je détaillerai quand j'étudierai en détail l'hypothèse Hephaios.

" C'est le douzième jour du premier mois d'hiver qu'a eu lieu le grand massacre des hommes ; aussi le calendrier des jours fastes et néfastes note-t-il soigneusement : "Hostile, Hostile, Hostile est le 12 Tybi, évite de voir une souris en ce jour, car c'est le jour où Rê donna l'ordre à Sekhmet". " (6)

Mythologie germano-scandinave : le Ragnarök

Pour les Germains et les autres peuples du Nord, la fin du monde était symbolisée par le *Ragnarök*, ou *Crépuscule des dieux*. Cette catastrophe cosmique de très grande ampleur est racontée en grand détail (mythologique, pas scientifique malheureusement !) dans le poème intitulé la *Voluspa* et qui fait partie du grand ensemble de l'*Edda*. De ce récit complexe qui met en place de nombreux dieux, je retiendrai les quelques extraits représentatifs suivants (7) :

" Du côté du Sud, là où commence le pays des géants du feu, Surt, le maître de ces contrées, dresse déjà son épée de flammes. Au bord du ciel est posté Heimdall, le veilleur des dieux ; personne au monde n'a la vue aussi perçante ni l'ouïe aussi fine ; pourtant, il se laisse ravir son épée par Loki et ne commence à souffler dans son cor retentissant que lorsque les géants sont en marche. Le loup Fenrir, que les dieux avaient jadis enchaîné, rompt ses liens et s'échappe. Les secousses qu'il donne à ses entraves font trembler la terre tout entière ; le vieux frêne Yggdrasil en est ébranlé des racines jusqu'au faite. Des montagnes s'écroulent ou se fendent de haut en bas...

Au Sud apparaît Surt, que suit la troupe innombrable des géants du feu ; son épée lance des éclairs ; tout autour de lui des flammes jaillissent du sol crevassé. A son approche les rochers s'écroulent, les hommes s'affaissent sans vie. La voûte du ciel, ébranlée par le tumulte de cette armée en marche, embrasée par l'haleine de fournaise qui l'entourne, éclate en deux ; et quand les fils du feu font passer leurs chevaux sur le pont que l'arc du ciel tend de la terre au séjour des dieux, ce pont s'enflamme et s'effondre...

Les grands dieux sont morts. Et maintenant que Thor, protecteur des demeures humaines, a disparu, les hommes sont abandonnés ; il leur faut quitter leurs foyers ; la race humaine est balayée de la surface de la terre. La terre elle-même va perdre sa forme. Déjà les étoiles se détachent du ciel et tombent dans le vide béant... Le géant Surt inonde de feu la terre entière ; l'univers n'est plus qu'un brasier ; des flammes jaillissent de toutes les fentes des rochers ; la vapeur siffle de toutes parts ; toute plante, toute vie sont anéanties ; seul le sol nu subsiste...

Et voici que toutes les mers, que tous les fleuves débordent. De tous côtés les vagues pressent les vagues. Les flots, qui se gonflent en bouillonnant, recouvrent peu à peu toutes choses. La terre s'enfonce dans la mer. L'immense champ de bataille où s'étaient affrontés les maîtres de l'univers cesse d'être visible.

Tout est fini. Et maintenant tout va recommencer. Des débris du monde ancien naît un monde nouveau... "

L'épopée cosmologique du Ragnarök est particulièrement intéressante pour qui étudie, comme moi, les cataclysmes cosmiques de l'Antiquité. Elle est aujourd'hui définitivement associée au dernier grand cataclysme cosmique qu'a subi la Terre et qui a eu lieu à la fin du XIII^e siècle av. J.-C., et dont je parlerai en détail au chapitre 19. Surt, Sekhmet, Typhon, Phaéton, Absinthe, Anat et d'autres encore sont les noms différents de l'objet cométaire (ou d'origine cométaire) qui est entré en collision avec la Terre, à une époque où de nombreuses civilisations étaient déjà bien en place et prospéraient, semant tout au long de son parcours la panique, la ruine et la mort. C'est ce même cataclysme qui est associé à l'Exode des Hébreux et aux dix plaies d'Égypte. J'en parlerai au chapitre 2, sous un éclairage assez différent : l'éclairage biblique.

Mythologie grecque : Typhon et Phaéton

Il s'agit de deux légendes célèbres, surtout connues par les textes classiques d'Hésiode (VIII^e siècle) (8) et d'Ovide (43 av. J.-C.-18) (9). Apparemment, elles n'ont rien à voir entre elles et sont toujours traitées séparément dans les livres de mythologie. Mais pourtant, il paraît fort probable qu'elles se rapportent toutes deux au cataclysme de la fin du XIII^e siècle dont j'ai déjà beaucoup parlé et qui a eu des conséquences humaines et historiques très sérieuses.

Hésiode raconte dans sa *Théogonie* qu'à la suite d'une guerre entre Zeus et les Titans, guerre qui faillit détruire l'univers, un monstre flamboyant surmonté de cent têtes et baptisé Typhon (ou Typhée) fit son apparition dans le ciel, effrayant les populations. Zeus dut intervenir une nouvelle fois pour sauver le monde.

" ... Alors une œuvre sans remède se fût accomplie en ce jour ; alors Typhon eût été roi des mortels et des Immortels, si le père des dieux et des hommes de son œil perçant soudain ne l'eût vu. Il tonna sec et fort, et la terre à l'entour retentit d'un horrible fracas, et le vaste ciel au-dessus d'elle, et la mer, et les flots d'Océan, et le Tartare souterrain, tandis que vacillait le grand Olympe sous les pieds immortels de son seigneur partant en guerre, et que le sol lui répondait en gémissant. Une ardeur régnait sur la mer allumée à la fois par les deux adversaires, par le tonnerre et l'éclair comme par le feu jaillissant du monstre, par les vents furieux autant que par la foudre flamboyante. La terre bouillonnait toute, et le ciel et la mer. De tous côtés, de hautes vagues se ruaient vers le rivage. Un tremblement incoercible commençait : Hadès frémissait et aussi les Titans ébranlés par l'incoercible fracas et la funeste rencontre. Zeus frappa, il embrasa d'un seul coup à la ronde les prodigieuses têtes du monstre effroyable ; et, dompté par le coup dont il

l'avait cinglé, Typhon mutilé, s'écroula, tandis que gémissait l'énorme terre. Mais, du seigneur foudroyé, la flamme rejaillit, au fond des âpres et noirs vallons de la montagne qui l'avait vu tomber. Sur un immense espace brûlait l'énorme terre, exhalant une vapeur prodigieuse ; elle fondait tout comme l'étain... sous l'éclat du feu flamboyant... "

(*Théogonie*, 836-868)

Pline l'Ancien (23-79) dans le livre II de son *Histoire Naturelle* (10), au chapitre " *Comètes et prodiges* " parle également de Typhon. En accord avec tous les autres auteurs "scientifiques" de l'Antiquité, il le considère comme une comète.

" ... Les peuples d'Éthiopie et d'Égypte connurent une comète terrible, à laquelle Typhon, roi de ce temps-là, donna son nom : d'apparence ignée et enroulée en forme de spirale, effrayante même à voir, c'était moins une étoile qu'un vrai nœud de flammes. "

(*Histoire Naturelle*, Livre II, 91, XXIII)

La légende de Phaéton est l'un des meilleurs contes d'Ovide qui en fit une des pièces maîtresses de ses *Métamorphoses*, écrites entre les années 2 et 8 de notre ère. Mais cette légende était bien antérieure à Ovide. On sait, entre autres, qu'elle fut le sujet d'une tragédie perdue d'Euripide (480-406), écrite plus de 400 ans auparavant.

Phaéton était le fils du Soleil. Pour satisfaire son orgueil, il demanda à son père de conduire son char l'espace d'une journée à travers le ciel. Entreprise démesurée qui se termina par une catastrophe cosmique, puisque le char de Phaéton quitta la route habituelle et se précipita vers la Terre. Là encore, Jupiter fut obligé d'intervenir pour sauver le monde et la race humaine.

" ... Sous l'action du feu, les nuages s'évaporent. Sur terre, les plus hauts sommets sont les premiers la proie des flammes. Le sol se fend, sillonné de crevasses et, toutes eaux tarées, se dessèche. Les prés blanchissent, l'arbre est consumé avec son feuillage, et les blés desséchés fournissent eux-mêmes un aliment au feu qui les anéantit... De grandes cités périssent avec leurs murailles ; des nations entières avec leurs peuples sont, par l'incendie, réduits en cendre. Les forêts brûlent avec les montagnes... L'Etna vomit, ses feux redoublés, des flammes démesurées... Phaéton voit, de toutes part, le monde en flammes... Il ne peut plus supporter les cendres et la chaude poussière partout projetée, il est enveloppé de toutes parts d'une fumée brûlante : où va-t-il, où est-il ? dans l'obscurité de poix où il est plongé, il l'ignore, et les chevaux ailés le ballottent à leur gré. C'est alors, croit-on, que les peuples d'Éthiopie, par

l'effet de leur sang attiré à la surface du corps, prirent la couleur noire. C'est alors que la Libye, toutes eaux tarées par la chaleur, devint aride. Alors les nymphes pleurèrent la perte des sources et des lacs... Le Nil épouvanté s'enfuit au bout du monde, dérochant aux yeux sa source... Le sol se fend sur toute sa surface... La mer diminue de volume ; une plaine de sable sec s'étend où naguère s'étalait le flot ; les montagnes que recouvraient les eaux profondes surgissent... La Terre nourricière des êtres, avec une grande secousse qui ébranla le monde, s'affaissa un peu au-dessous de son niveau habituel... Pourquoi le niveau des mers décroît-il ? Atlas lui-même est à bout de forces, il a peine à supporter sur ses épaules le monde incandescent... Alors le père tout-puissant, ayant pris à témoin les dieux et celui-là même qui avait prêté son char, que s'il ne lui porte secours, le monde entier périrait victime d'un funeste sort, gagne au sommet du ciel le point élevé d'où il a coutume d'envelopper de nuages l'étendue des terres, d'où il met en mouvement le tonnerre et lance la foudre... Il tonne, et brandissant la foudre, il la lança sur le cocher auquel il fit perdre du même coup la vie et l'équilibre, et de ses feux redoutables il arrêta l'incendie. Les chevaux s'abattent et d'un soubresaut tentant de se redresser, ils arrachent leur cou au joug et échappent aux sangles rompues. Ici traînent d'un côté les rênes, là l'essieu détaché du timon, ailleurs les rayons des roues brisées, et les débris du char mis en pièces sont épars au loin.

Quant à Phaéton, ses cheveux rutilants en proie aux flammes, il roule sur lui-même dans le gouffre, laissant dans l'air au passage une longue traînée... Loin de sa patrie, à l'autre bout du monde, le très grand Éridan le reçoit et lave son visage fumant... "

Ce texte d'Ovide, version "moderne" de textes plus anciens est très instructif quand on y lit entre les lignes. Il nous apprend en fait plusieurs choses, bien qu'il mêle parfois le meilleur et le pire. Le pire est sans doute ce qu'il dit sur l'origine de la couleur noire des Éthiopiens ! Il nous apprend par contre que le Nil fut mis à sec, que la Libye devint aride, que le niveau de la mer baissa, que tout fut brûlé, qu'une poussière chaude empoisonna les aliments et qu'ensuite il y eut une période de ténèbres. Il signale également que l'Etna " vomit des flammes démesurées ". On ne peut s'empêcher de faire le rapprochement avec ce célèbre passage de *l'Apocalypse* dont je parle au chapitre 2 :

" ... une étoile était tombée du ciel sur la terre, il lui fut donné la clef du puits de l'abîme. Elle ouvrit le puits de l'abîme. Il monta du puits une fumée comme d'une grande fournaise et le soleil et l'air furent obscurcis par la fumée du puits... "

On peut se demander à la lecture de ce texte, si un fragment de Phaéton (qui s'appelait Absinthe chez les Hébreux et Sekhmet chez les Egyptiens) n'est pas tombé dans la Méditerranée déclenchant par là même une importante éruption de l'Etna. Cette remarque très intéressante pourrait permettre de dater l'événement (voir le chapitre 19)

Quoi qu'il en soit, ces deux légendes de Typhon et Phaéton, comme celle du Ragnarök, montrent bien comment à partir d'un fait réel marquant, les auteurs de l'Antiquité ont mis sur pied leur mythologie si compliquée, avec ses dieux multiples, ses héros innombrables, ses grands thèmes, sa cosmologie. Il est probable que, sous le manteau du mythe, chaque récit mythologique reprend, transforme et embellit des événements authentiques dont la signification réelle dépassait souvent l'entendement des peuples de l'époque. Mais une chose est sûre, ils savaient bien quand un cataclysme était d'origine cosmique. Les bouleversements terrestres qui en résultaient et les lourdes pertes en vies humaines étaient du concret, pas de l'imaginaire.

Le catastrophisme astrologique : alignements et cycles cosmiques

Déjà, dans la haute Antiquité, certains savants et philosophes des grandes civilisations entretenaient le mythe de l'éternel retour (11) ou celui de la Grande Année (12) qui étaient censés ramener la régénération périodique de la vie.

Pour les Anciens, l'histoire n'était donc qu'une suite de cycles cosmiques de durée variable. Le jour, la lunaison, les saisons, l'année, le cycle de Méton, pour les cycles de durée humaine. Et surtout la Grande Année (quelques milliers d'années en général), avec une création, un épanouissement (l'Age d'or, cher aux civilisations de l'Antiquité), un épuisement et enfin une destruction. Les cataclysmes par lesquels se terminaient chez les Grecs un cycle cosmique étaient soit *le feu cosmique (ekpyrosis)* qui brûlait le monde, soit *le déluge (kataclysmos)* qui au contraire l'inondait.

Sénèque (4 av. J.-C.-65), dans ses *Questions naturelles* (13), a cru pouvoir donner, d'après le prêtre chaldéen Bérosee (v. 330-v. 260) (14), les raisons de ces catastrophes périodiques :

" Déluge et embrasement arrivent, quand Dieu a trouvé bon de mettre fin à l'ancien monde et d'en commencer un meilleur. L'eau et le feu règnent sur les choses de la Terre. D'eux viennent également la naissance et la mort. Ainsi quand le renouvellement du monde est décidé, la mer fond d'en haut sur nos têtes, tout comme le feu fait rage, si un autre genre de catastrophe a été préféré. "

(Livre III, XXVIII, 7)

" Bérosee, le traducteur de Bêlus, attribue aux planètes la cause de ces bouleversements. Sa certitude à cet égard va jusqu'à fixer la date de la conflagration et du déluge universels. Tout ce qui est terreux, dit-il, sera embrasé lorsque les astres qui suivent maintenant des orbites différentes se réuniront tous dans le signe du Cancer et se rangeront en file, de manière qu'une ligne droite puisse passer par les centres de toutes les sphères. Le déluge aura lieu, quand ces mêmes planètes viendront prendre place dans le Capricorne. Le solstice d'été est amené par la première de ces deux constellations, celui d'hiver par la seconde. Ce sont donc des signes d'une grande puissance, puisque leur influence se manifeste par le changement même de l'année. "

(Livre III, XXIX, 1)

On sait aujourd'hui que ces super-conjonctions des sept astres errants connus des Anciens (le Soleil, la Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) ne sont en aucune façon capables de provoquer les cataclysmes cités par Bérosee, mais celui-ci est affirmatif : leur cause est astronomique.

En fait, dès l'Antiquité, certains philosophes savaient pertinemment que la Terre n'est qu'une planète parmi d'autres. Cléomède (I^{er} siècle av. J.-C.) enseignait qu' " *il y a plus de planètes que l'on en voit* " et Démocrite (460-370) et beaucoup plus tard Origène (185-254) que " *les mondes périssent par collisions* " (15). Les Stoïciens étaient également persuadés que notre monde trouvera sa destruction finale en heurtant un autre monde.

Ce qu'il faut retenir principalement, c'est que cette notion de *cycles cosmiques* est universelle. Les peuples des cinq continents qui avaient une tradition millénaire ont parlé de grands bouleversements naturels, qui étaient soit d'origine cosmique, soit purement terrestres selon les cas. Nous avons vu avec les Aztèques que ces cycles s'appelaient généralement des *âges* ou des *soleils*, ou pouvaient avoir un nom particulier chez certains peuples. Leur nombre était variable, compris ordinairement entre quatre et dix.

L'universalité de cette notion de cycles cosmiques est la preuve que des catastrophes importantes, pouvant causer la mort d'une partie appréciable des populations humaines et animales, ont été le lot de toutes les parties du monde. Étonnamment, le langage est le même dans le Bassin méditerranéen, qu'en Amérique centrale, en Extrême-Orient ou en Polynésie.

Cependant, il faut bien insister sur le fait que, dans la plupart des cas, il s'agissait d'événements régionaux, ou même seulement locaux parfois, qui n'ont pu semble-t-il concerner l'ensemble de la planète. Les effondrements périodiques du firmament ou les pluies de feu souvent cités dans les textes et traditions orales des Anciens se rapportent à des cataclysmes cosmiques (certainement la collision de petits astéroïdes ou de comètes ou de leur

explosion dans l'atmosphère) plus ou moins importants, mais surtout beaucoup plus fréquents que ce qu'on croyait jadis.

Pour les 10 000 ans qui ont précédé l'ère chrétienne, il paraît quand même très douteux qu'un seul d'entre eux ait pu avoir des conséquences vraiment planétaires, ou qu'il ait pu produire les effets de ce que l'on appelle de nos jours un hiver d'impact mondial, et plonger ainsi la planète dans l'obscurité pendant des dizaines d'années. Comme nous le verrons au chapitre 12, qui traite de la fin des dinosaures et de nombreuses autres espèces il y a 65 millions d'années, un hiver d'impact aurait eu des conséquences beaucoup plus graves, notamment en détruisant la chaîne alimentaire. Il n'est pas sûr alors que les peuples du Néolithique aient pu seulement survivre.

L'avertissement de Platon

Bien entendu, comme tous les philosophes de l'Antiquité ayant vécu avant et après lui, l'illustre Platon (427-347) avait son idée sur la raison des catastrophes qui dévastaient la Terre à de grands intervalles de temps. Quatre siècles avant notre ère, et s'appuyant sur une " *science blanchie par le temps* ", c'est-à-dire qui a fait ses preuves et qui sait de quoi elle parle, il a écrit ces phrases lumineuses et inspirées dans son *Timée* (16) , qu'il est bon de rappeler et surtout de méditer :

" ... Vous êtes tous jeunes d'esprit ; car vous n'avez dans l'esprit aucune opinion ancienne fondée sur une vieille tradition et aucune science blanchie par le temps. Et en voici la raison. Il y a eu souvent et il y aura encore souvent des destructions d'hommes causées de diverses manières, les plus grandes par le feu et par l'eau, et d'autres moindres par mille autres choses. Par exemple, ce qu'on raconte aussi chez vous de Phaéton, fils du Soleil, qui, ayant un jour attelé le char de son père et ne pouvant le maintenir dans la voie paternelle, embrasa tout ce qui était sur la terre et périt lui-même frappé de la foudre, a, il est vrai, l'apparence d'une fable ; mais la vérité qui s'y recèle, c'est que les corps qui circulent dans le ciel autour de la terre dévient de leur course et qu'une grande conflagration qui se produit à de grands intervalles détruit ce qui est à la surface de la terre. Alors tous ceux qui habitent dans les montagnes et dans les endroits élevés et arides périssent plutôt que ceux qui habitent au bord des fleuves et de la mer ... Quand, au contraire, les dieux submergent la terre sous les eaux pour la purifier, les habitants des montagnes, bouviers et pâtres, échappent à la mort, mais ceux qui résident dans nos villes sont emportés par les fleuves dans la mer ... "

Timée (22b-22d)

Platon avait raison, tout au moins sur le fond, il y a vingt-quatre siècles : *des corps célestes dévient de leur course et viennent frapper la Terre.*

Les érudits de son époque savaient, parce que leurs lointains prédécesseurs, qui en avaient sérieusement souffert dans leur chair, n'avaient pas omis de transmettre le message de génération en génération, que les cataclysmes d'origine cosmique étaient une réalité d'hier et de toujours. Mais selon les écoles de pensée, les théories étaient assez différentes. Certains croyaient à la destruction totale du monde, et à sa régénération, d'autres non. Platon était entre les deux : c'était un catastrophiste "modéré".

Doctrines et écrits des philosophes et scientifiques de l'Antiquité

Nous devons à Pierre Duhem (1861-1916) une œuvre incomparable par sa richesse et son intérêt historique : *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic* (17), en dix volumes. Cette somme incontournable me sert ici de référence principale. Se basant lui-même sur le travail des grands historiens de l'astronomie des XVIII^e et XIX^e siècles, et en en réalisant une synthèse d'une précision acérée, il a pu détailler toutes les grandes doctrines cosmologiques des philosophes de l'Antiquité, doctrines qui souvent se chevauchaient. Car il n'y a jamais eu unanimité, et pour cause, puisque aucune hypothèse des Anciens ne représentait réellement la réalité.

Il faut d'abord rappeler que les derniers très grands cataclysmes physiques ayant eu des répercussions dans tout le Bassin méditerranéen remontent au II^e millénaire. Il y en a eu deux, de nature totalement différente : d'abord, l'explosion du Santorin, vers -1600 (18), un fantastique événement volcanique et géologique, sans doute très impressionnant pour tous les témoins du phénomène et les survivants, qui ont dû constater médusés l'anéantissement total d'une montagne haute de 1000 mètres, paraît-il, sacrée de surcroît, considérée souvent comme la demeure des dieux ; ensuite, l'impact de la comète Sekhmet vers -1200, et toutes ses multiples conséquences pour les populations et les civilisations de la région et même de toutes les régions environnantes.

Il n'y eut aucun très grand cataclysme durant le I^{er} millénaire, et à chaque génération, le souvenir de ces grands cataclysmes se faisait plus lointain et plus incertain. Chaos, feu du ciel, chute du ciel, déluge, après avoir été réalité avaient rejoint le mythe, et les philosophes grecs et romains, pour les intégrer dans leur vision globale de l'histoire du monde, devaient recourir à des périodes de plus en plus longues, où le millier d'années était l'unité de base. Homère (v. 850 av. J.-C.) et Hésiode ignoraient déjà la réalité et la nature exacte, faute de documents écrits qui n'ont probablement jamais existé en Grèce, des deux grands événements, et les avaient intégrés avec plus ou moins de bonheur dans leurs récits, dans lesquels ils se bornaient à préserver *l'idée* de catastrophes.

Anaximandre, l'un des premiers grands astronomes grecs (le premier il envisagea une Terre sphérique et on lui doit la découverte de l'obliquité de l'écliptique) professait déjà l'opinion qu'au cours de l'éternité se succèdent une infinité de mondes dont chacun a une durée limitée.

" L'Infini paraît avoir en sa possession la cause totale de la génération et de la destruction de l'Univers. C'est de cet Infini que se sont séparés les cieux et tous les mondes qui, pris dans leur ensemble, sont infinis. De l'éternité infinie provient la destruction, comme la génération en était issue longtemps auparavant ; toutes ces générations et ces destructions se reproduisent d'une manière cyclique. " (19)

Comme le note Pierre Duhem :

" Nous voyons ici Anaximandre affirmer un double infini : Une étendue infinie, principe de la coexistence d'une infinité de mondes simultanés ; une éternité infinie, principe des générations et des destructions périodiques d'une infinité de mondes successifs. " (20)

Vers le milieu du I^{er} millénaire, Héraclite (540-480), comme beaucoup de philosophes de la Grèce ancienne, était encore obnubilé par *la puissance du feu*, souvenir déjà lointain à son époque (sept siècles s'étaient écoulés) de celui qui avait embrasé et dévasté des régions entières vers -1200 et qui avait entraîné un terrible recul de plusieurs siècles (les fameux quatre "siècles obscurs" de la chronologie grecque compris entre -1200 et -800) pour les civilisations de la Méditerranée orientale. Héraclite considérait le feu comme l'élément essentiel d'un monde éternel dans lequel Dieu n'avait pas sa place.

" Le monde n'a été fait ni par un dieu ni par un homme ; il a toujours été, il est et il sera toujours, le feu toujours vivant, qui s'allume régulièrement et s'éteint régulièrement. "

Plus tard, dans la seconde partie du I^{er} millénaire avant J.-C., quatre doctrines principales tentaient d'expliquer l'histoire du monde. Celle de Démocrite et de ses disciples, parmi lesquels Épicure (341-270) et beaucoup plus tard Lucrèce (98-55), celle de Platon, celle d'Aristote (384-322) et celle de Zénon (335-264) et de l'école stoïcienne, dont Sénèque fut un lointain disciple. Pour tous ces philosophes, le dilemme se résumait à la question suivante : "*Le monde est-il éternel ou a-t-il une fin ?*".

Voyons très rapidement les différents points de vue (21).

Pour Aristote, *le monde est éternel*, et tout signe tangible de dépérissement doit être compensé par des signes de rajeunissement d'une intensité comparable. Son monde est en équilibre. Comme il est éternel, il n'a pas été créé. Il n'a pas besoin d'un démiurge pour causer une catastrophe.

Pour les Stoïciens, *le monde entier est périssable*, et subit des phases alternées de destruction et de restauration. Eux aussi sont matérialistes. Les manifestations évidentes de décrépitude sont les symptômes d'une fin prochaine. Mais après la conflagration universelle qui réduit tous les éléments au feu primitif, le monde renaîtra tel qu'il fut précédemment. Il y a par conséquent un *éternel retour* des êtres et aussi des événements. C'est la fameuse tirade de Némésius d'Émèse (IV^e-V^e siècle), un lointain disciple de Platon : " *Il y aura de nouveau un Socrate, un Platon... et cette restauration ne se produira pas une fois, mais plusieurs* ". Comme chez Aristote, en fait, le monde est éternel, mais pour l'école stoïcienne, il y a *renouvellement, régénération périodique*. Sénèque, qui se référait volontiers à cette école dont il se sentait proche, expliquait au I^{er} siècle de notre ère que le monde périclame régulièrement et cycliquement par déluge et embrasement.

Pour les disciples de Démocrite, et plus tard d'Épicure, le monde périclame aussi à la suite d'une conflagration, mais il se distingue nettement de celui des Stoïciens par la place tenue par *le hasard*. Il n'y a pas retour périodique des mêmes événements. Pour eux, c'est *un monde nouveau qui démarre sur les ruines de l'ancien*. Cette vision paraît étonnamment moderne.

Platon est assez proche du catastrophisme stoïcien. La conflagration ne fait pas de doute pour lui, je l'ai dit plus haut. Mais chez lui le monde n'est pas anéanti totalement, c'est seulement *l'humanité qui pâtit sérieusement du cataclysme*. Le monde perdure après les grandes catastrophes de la conflagration et du déluge, comme chez son ancien élève Aristote. Mais la grosse différence avec celui-ci, c'est que pour Platon *le monde est créé et détruit par Dieu*. Pour lui, les catastrophes sont des moyens choisis par Dieu pour purifier la Terre. Les historiens des sciences estiment que Platon fait la synthèse entre Aristote et Zénon, mais que c'est un auteur plus ancien (?), bien que fort perspicace nous l'avons vu, dans la mesure où il est moins bien dégagé qu'eux des mythologies aux dieux interventionnistes.

Dans son livre *La fin du monde. Enquête sur l'origine du mythe* (22), l'historienne des mythes Christine Dumas-Reungoat étudie très en détail les différents textes de l'Antiquité concernant l'éternel problème de la fin du monde. Elle les différencie en deux grandes catégories : *La fin du monde* et *la fin d'un monde*. Tous les cataclysmes subis par les peuples de l'Antiquité ressortent évidemment de cette seconde catégorie, puisque tous, avec plus ou moins de pertes humaines, ont survécu et ont pu redémarrer sur des bases nouvelles, mais avec un recul culturel souvent très important.

Notes

1. En fait, on a découvert beaucoup plus tard que la période de dix-neuf ans qui caractérise le cycle lunaire avait déjà été découverte par les Chinois, 1600 ans avant Méton.

2. R. Escarpit, *Contes et légendes du Mexique* (Nathan, 1963). Citation p. 10.

3. P. Ravignand et A. Kielce, *Cosmogonies. Les grands mythes de Création du Monde* (Le Mail, 1988). Citation p. 110.
4. F. Braunstein et J.-F. Pépin, *Les grands mythes fondateurs* (Ellipse, 1995). Citation p. 40.
5. Le calendrier égyptien était basé sur une année de 365 jours seulement, d'où une dérive annuelle de 0,2422 jour par an, 6 jours pour 25 ans, 12 jours pour 50 ans, 18 jours pour 75 ans, etc. Le 12 Tybi de l'année 1321 avant J.-C. correspondait au 27 novembre de notre calendrier grégorien, le 12 Tybi de 1271 au 15 novembre, celui de 1221 au 3 novembre et celui de 1196 au 28 octobre. Il reste à trouver *l'année* exacte du cataclysme pour ajuster *la date* exacte. Si 1209 avant J.-C. (soit -1208) est la bonne année (ce qui n'est pas sûr, ce n'est qu'une approximation à 10 ou 20 ans près qui dépend de la chronologie exacte des pharaons, très mal connue et variable selon tous les auteurs), la date de la collision cosmique serait alors voisine du 31 octobre.
6. F. Guirand et J. Schmidt, *Mythes & Mythologie. Histoire et dictionnaire* (Larousse, 1996). Cet ouvrage collectif très remarquable raconte la mythologie et les mythes du monde entier. Le chapitre 2 (pp. 23-68), dû à J. Viau, concerne la mythologie égyptienne. Citation p. 53.
7. *Ibid.* Le chapitre 8 (pp. 291-338), dû à E. Tonnelat, concerne la mythologie germanique (Allemagne et pays scandinaves). L'auteur parle évidemment du *Crépuscule des dieux* qu'il raconte d'une manière détaillée et homérique (pp. 325-328). On reconnaît d'ailleurs dans cette légende une analogie certaine avec la très vieille légende grecque de Typhon racontée en son temps par Hésiode dans sa *Théogonie*. Ces deux légendes immortalisent un même phénomène, celui de la collision entre la Terre et un objet cométaire racontée dans le chapitre 19 et qui se produisit vers -1208.
8. Hésiode, *Théogonie* (Les Belles Lettres, 1977 ; traduction par P. Mazon). Citation p. 62-63. Hésiode ne connaissait plus avec précision les grandes catastrophes qui avaient eu lieu au II^e millénaire. La compression du temps avait déjà joué son rôle et sa *Théogonie* regroupe sous forme de mythes des données très hétéroclites et d'époques différentes. Cela tendrait à prouver que des *sources écrites* sur les grands cataclysmes du passé n'ont jamais existé, tout au moins en Grèce. Cette hypothèse est confirmée par le fait que les philosophes grecs plus tardifs ne parlent jamais de l'éruption du Santorin avec un minimum de précision. Seul le bouche à oreille permit, les premiers temps, de perpétuer le *souvenir* de cataclysmes destructeurs.
9. Ovide, *Les métamorphoses* (Garnier-Flammarion, 1966 ; traduction par J. Chamonard). Citation p. 70-73.
10. Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, Livre II (Les Belles Lettres, 1950 ; traduction par J. Beaujeu). Citation p. 39-40.

11. M. Eliade, *Le mythe de l'éternel retour* (Gallimard, 1969). Mircea Eliade (1907-1986) était un remarquable érudit, spécialiste de l'histoire des religions et des mythes. Tout comme l'autre grand spécialiste de ces questions, Georges Dumézil (1898-1986), il n'a jamais fait le rapprochement entre le mythe, l'histoire et les connaissances astronomiques disponibles à son époque, faute probablement d'une formation scientifique appropriée. Dans l'esprit de ces deux chercheurs, le cataclysme est toujours resté un phénomène abstrait, *mythique*. Pour eux, si le mythe et l'histoire pouvaient éventuellement fusionner dans certains cas, il n'en était pas de même entre le mythe et la science.

12. A. Barbault, *L'astrologie mondiale* (Fayard, 1979). Ce livre écrit par l'un des astrologues les plus cultivés traite longuement de la Grande Année, qui, il ne faut jamais l'oublier, était avant tout un problème astrologique. La cyclogie a toujours été l'un des thèmes favoris de tous ceux qui prétendent prévoir l'avenir du monde.

13. Sénèque, *Questions naturelles*, op. cit., citations pp. 154-155. Le livre troisième dont sont tirés ces deux extraits s'intitule " *Des eaux terrestres* ". Lui aussi est très intéressant. Sénèque était un avant-gardiste qui aurait pu éclipser Ptolémée avec un peu de chance. La face du monde culturel aurait pu en être totalement changée.

14. M. Rutten, *La science des Chaldéens* (PUF, QS 893, 1970).

15. E.M. Antoniadi, *La découverte du système héliocentrique du monde en Grèce antique*, L'Astronomie, 41, pp. 449-458, 1927.

16. Platon, *Timée* (Garnier-Flammarion, 1969 ; traduction par E. Chambry). Classique parmi les classiques, ce passage du *Timée* a traversé les siècles, mais il n'a vraiment pris toute son ampleur et toute sa force que depuis qu'on a enfin compris et expliqué la réalité de l'impactisme terrestre. Citation p. 405.

17. P. Duhem, *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic* (Hermann, 10 volumes, 1913-1957). Le travail de Pierre Duhem (1861-1916), philosophe, érudit et historien des sciences restera comme l'un des plus importants du XX^e siècle en ce qui concerne l'histoire de l'astronomie. On ne se lasse pas de consulter ces livres d'une grande érudition, documentation incontournable sur l'Antiquité et le Moyen Age. On peut les consulter (et les télécharger) en intégralité sur le site de la Bibliothèque Nationale.

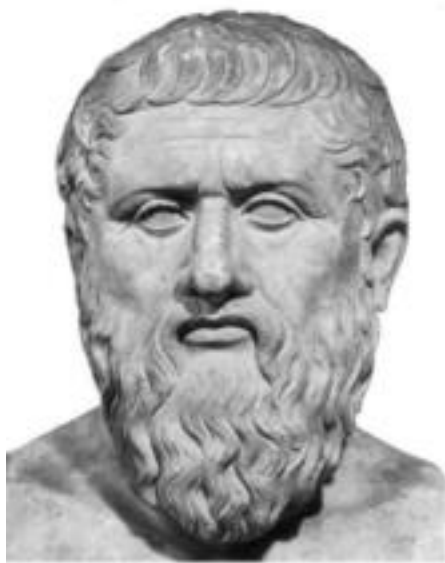
18. J'étudierai ce cataclysme en détail au chapitre 18, consacré aux grands cataclysmes *terrestres* de la protohistoire et de l'Antiquité. En effet, certains d'entre eux ont toujours interféré avec les cataclysmes *cosmiques*. Comme nous le verrons, il a fallu attendre le XX^e siècle pour les identifier avec précision.

19. *Le système du monde*, citation p. 70. Il s'agit d'un texte d'Eusèbe.

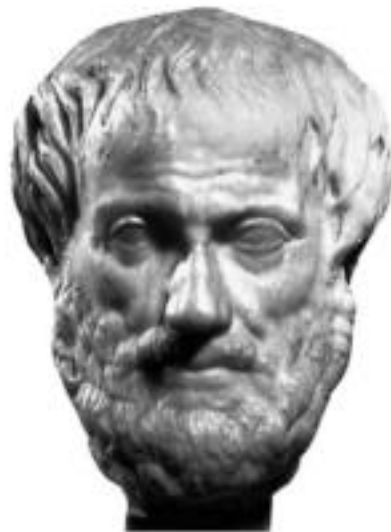
20. *Le système du monde*, citation p. 71.

21. Le lecteur intéressé par cet intéressant sujet, que je ne peux que survoler ici, pourra se reporter aux ouvrages spécialisés, et notamment à celui de Duhem, très explicite et très détaillé.

22. C. Dumas-Reungoat, *La fin du monde. Enquête sur l'origine du mythe* (Les Belles Lettres, 2001). La lecture de ce livre est indispensable par tous ceux qui sont intéressés par les cataclysmes du passé, et aussi par la façon dont ils ont été retenus et transmis par les historiens de l'Antiquité. Derrière le mythe, le cataclysme était bien réel.



PLATON (427-347)



ARISTOTE (384-322)

Figure 2. **Platon, Aristote et les doctrines cosmologiques**

Platon et son ancien élève Aristote ne voyaient pas le monde de la même manière. Pour Platon, le monde perdurait après les grandes catastrophes de la conflagration et du déluge, et le monde est créé et détruit par Dieu.

Pour Aristote, par contre, le monde est éternel et tout signe de dépérissement doit être compensé par des signes de rajeunissement d'une intensité comparable. Comme il est éternel, il n'a pas été créé.

La doctrine de Démocrite, et plus tard d'Épicure, paraît aujourd'hui beaucoup plus moderne que celles de ces deux grands philosophes.

CHAPITRE 2

DÉLUGE ET CATASTROPHISME BIBLIQUE

La Bible, le livre incontournable

Avec l'émergence du christianisme, à partir du premier siècle de notre ère, *la Bible* s'imposa très progressivement comme un livre majeur dans les pays christianisés, et les écrits qu'elle contient le dogme. Au Moyen Age, *la Bible* était devenue LE Livre, supplantant tous les autres, notamment les grands textes des Anciens, ravalés souvent au rang de balivernes quand la Nature y primait le Créateur. Toutes les doctrines et idées mûries au cours des siècles, tous les mythes et légendes transmis scrupuleusement depuis toujours n'étaient que fadaïses à oublier. Seuls les textes sacrés qui avaient eu la chance de recevoir "l'imprimatur" (les apocryphes aussi étaient mis à l'écart) avaient force de loi. Cela explique un peu pourquoi la marge de manœuvre des rares érudits du Moyen Age était si étroite. A certaines époques, il n'était pas facile de jouer les francs-tireurs sans hypothéquer sa propre sécurité. Inutile de dire que tout cela n'est pas bon pour l'évolution des idées.

Cette triste réalité rappelée, il n'en demeure pas moins que *la Bible* est un recueil de textes dont certains sont très intéressants pour le sujet qui occupe principalement dans ce livre : l'impactisme et le catastrophisme d'origine cosmique. *La Bible* n'est pas avare de catastrophes voulues par Dieu pour punir les humains récalcitrants et pêcheurs invétérés.

Je vais parler ici des textes et des idées, réservant pour les chapitres 18 et 19 l'interprétation scientifique que l'on se fait aujourd'hui de ces catastrophes diverses à la lumière des connaissances modernes. Il faut savoir, en effet, que le XX^e siècle a permis de faire sur plusieurs points importants le tri entre la réalité et la légende, et même parfois d'obtenir des résultats incontestables et incroyables sur certains sujets que l'on pensait être des énigmes à jamais indéchiffrables. La possibilité de datations précises, notamment, a été un progrès extraordinaire qui a permis de préciser le calendrier d'événements distincts totalement imbriqués (à tort) les uns dans les autres, car "écrasés" par le temps.

Le Déluge biblique, le premier grand fléau

Quelle définition peut-on donner du *Déluge biblique* de nos jours ? Dans son monumental *Dictionnaire de la Bible*, André-Marie Gerard (1918-1989), donne parmi beaucoup d'autres les renseignements suivants (1) :

" Cataclysme où, selon le texte biblique et les plus anciennes traditions d'Orient, périrent sous les eaux l'ensemble des vivants

répandus sur la terre ; seuls échappèrent par la faveur divine à cette destruction un homme et sa famille, géniteurs d'une humanité nouvelle, et les spécimens des autres espèces qu'ils avaient sauvés avec eux afin d'assurer le renouvellement de toute la vie terrestre au terme de l'inondation...

Dans la forme que nous lui connaissons, le récit apparaît comme la combinaison de deux documents rédigés au X^e ou IX^e siècle et au VI^e siècle avant J.-C., à partir de la tradition orale et écrite d'Israël...

Il n'est pas impossible que la monstrueuse inondation dont les archéologues ont par exemple relevé les traces dans la région d'Our ait été "le Déluge" dont fait état la tradition des peuples de Mésopotamie : une couche alluvionnaire de trois mètres d'épaisseur environ, vide de tout vestige de l'industrie humaine, sépare des couches riches en débris révélateurs de deux civilisations de niveaux très différents ; sa formation daterait du début du quatrième millénaire. "

A noter surtout le fait que la rédaction du texte biblique concernant le Déluge date du I^{er} millénaire avant J.-C. Autant dire qu'on ne sait rien de concret sur ce qui s'est vraiment passé, même si les chercheurs actuels essaient de démêler et de comprendre les différents aspects du problème (2).

Si l'on se réfère au *Livre de la Genèse*, placé en tête des cinq livres du *Pentateuque* et donc le premier de *la Bible* elle-même (3), le Déluge est présenté de la manière suivante, étant bien entendu qu'il s'agit d'une "punition" infligée par Dieu aux humains :

" L'an six cent de la vie de Noé, le deuxième mois, le dix-septième jour du mois, en ce jour-là, se fendirent toutes les fontaines du grand Abîme et s'ouvrirent les écluses des cieus. Il y eut averse sur la terre quarante jours et quarante nuits...

Les eaux grandirent et s'accrurent beaucoup, beaucoup, au-dessus de la terre et toutes les hautes montagnes qui existent sous tous les cieus furent recouvertes. Les eaux avaient grandi de quinze coudées de haut et les montagnes avaient été recouvertes. Alors expira toute chair qui remue sur la terre : oiseaux, bestiaux, animaux, toute la pullulation qui pullulait sur la terre, ainsi que tous les hommes. Tout ce qui avait en ses narines une haleine d'esprit de vie, parmi tout ce qui existait sur la terre ferme, tout mourut. Ainsi furent supprimés tous êtres qui se trouvaient à la surface du sol depuis les hommes jusqu'aux bestiaux, jusqu'aux reptiles et jusqu'aux oiseaux des cieus. Ils furent supprimés de la terre, il ne resta que Noé et ceux qui étaient avec lui dans l'arche. Et les eaux grandirent au-dessus de la terre durant cent cinquante jours. "

La *Genèse* date le Déluge en l'an 600 de la vie de Noé, le patriarche biblique acteur de l'événement. La chronologie des divers patriarches bibliques étant connue, tout au moins approximativement, les exégèses de la Bible ont situé en général le cataclysme en l'année 1657 de la création du monde, que l'on apparente à l'année 2349 avant notre ère. Le Déluge biblique serait donc un événement ayant eu lieu durant le III^e millénaire, à une période où plusieurs civilisations avancées étaient déjà en place et furent, sinon les témoins directs, tout au moins indirects par les témoignages qu'ils eurent à connaître de leurs voisins.

L'origine de la catastrophe reste bien sûr imprécise, plusieurs possibilités acceptables étant en concurrence pour l'expliquer. Parmi les hypothèses possibles, on pense notamment à une inondation géante résultant d'un séisme très important dans le golfe Persique qui aurait entraîné une transformation des fonds marins (peu profonds), et à l'impact d'un astéroïde ou d'une comète dans l'océan Pacifique (l'océan Oriental des Anciens). J'étudierai ces hypothèses aux chapitres 18 et 19.

Sodome et Gomorrhe, la vengeance de Dieu

La Bible raconte que, à l'époque d'Abraham (XIX^e siècle avant J.-C.), quatre villes proches de la mer Morte : Sodome, Gomorrhe, Adma et Seboïm furent détruites par "le feu et le soufre venant du ciel", une cinquième, Soar, étant épargnée par Dieu. La raison invoquée de cette destruction est l'impiété de leurs habitants et la perversité de leurs mœurs.

Dans l'article "Sodome" de son *Dictionnaire de la Bible*, A.-M. Gerard explique :

" Malgré l'intercession d'Abraham à qui Dieu avait révélé son dessein, deux anges se rendirent à Sodome pour détruire la ville. Seuls Lot et les siens furent épargnés : "*Yahvé fit pleuvoir sur Sodome et sur Gomorrhe du soufre et du feu venant du ciel*". Les géologues et les archéologues ont épilogué sur ce déluge "de soufre et de feu" : on a même parlé de bombe atomique. Il semble qu'une nuée ardente ou un phénomène volcanique analogue à celui qui a anéanti Pompéi ait pu se produire vers l'an 2000 avant J.-C., dans la fosse géologique qui représente la mer Morte et qui date de l'ère tertiaire. Selon certains, les villes maudites auraient été situées au nord de la mer Morte, où une exploration menée en 1930 par l'Institut pontifical biblique a relevé une grande masse de cendres ; plus nombreux sont les spécialistes qui les situent au sud, là où un fond récent n'est immergé que d'une douzaine de mètres, et où s'élève aujourd'hui le djebel Usdum, dont le nom semble avoir conservé le souvenir de Sodome et dont la contexture, du sel gemme, évoque la transformation de la femme de Lot, lors de la fuite de Lot et des siens devant l'imminence du fléau, en châtiment de sa curiosité. "

Ce deuxième grand cataclysme raconté dans *la Bible* date de l'époque d'Abraham et est donc beaucoup plus récent que le Déluge. J'expliquerai au chapitre 18 qu'il fut probablement dû à un événement sismique. Cependant certains astronomes pensent qu'il pourrait s'agir de la chute d'un noyau cométaire sur la Terre.

Les dix plaies d'Égypte

Ces Plaies d'Égypte sont contemporaines de Moïse (XIII^e siècle avant J.-C.) et de la sortie d'Égypte. Elles datent donc de la fin du XIII^e siècle. On croit aujourd'hui qu'elles sont liées à un très important cataclysme d'origine cosmique que je détaillerai au chapitre 19 : *l'impact sur la Terre de la comète Sekhmet*. C'est la fameuse comète dont parle Pline (la "comète terrible" qui faisait frissonner rétrospectivement les Anciens) et qui a donné lieu à certaines légendes dont j'ai parlé au chapitre 1.

Les catastrophistes actuels sont en mesure de dater avec une bonne précision ce drame cosmique dont les répercussions ont été immenses, mais totalement ignorées, étonnamment, par les historiens qui n'aiment pas que des scientifiques viennent "empiéter leurs plates-bandes". Ces historiens, comme d'autres intellectuels, sont victimes du fameux verrou psychologique dont il sera question à plusieurs reprises tout au long de ce livre. Mais il faut savoir que les causes astronomiques du drame ne pouvaient être appréhendées avec précision que par des astronomes.

Pour en revenir aux Plaies d'Égypte, que de nombreux chercheurs modernes mettent en parallèle avec les différents fléaux de l'Apocalypse, on sait qu'en fait elles correspondent assez bien aux conséquences "normales" d'un impact cométaire, comme je l'expliquerai au chapitre 19.

La chute de pierres et le "miracle" de l'époque de Josué

On connaît par *la Bible* la relation d'une importante chute de pierres qui eut lieu au temps de Josué (XIII^e-XII^e siècle av. J.-C.) dans les environs de Gabaon en Judée. Elle figure au verset XI, chapitre X, du livre de Josué :

" ... Il advint, comme ils [les Amorrhéens] fuyaient devant Israël et qu'ils étaient à la descente de Beth-Horon, que Iahvé lança des cieus contre eux de grandes pierres jusqu'à Azéquah et ils en moururent. Ceux qui moururent par les pierres de grêle furent plus nombreux que ceux que les fils d'Israël tuèrent par l'épée. "

A cette chute de pierres, sans doute importante puisqu'elle frappa l'imagination des peuples de l'Asie mineure qui en conservèrent la trace dans leurs traditions et leurs écrits, est lié le fameux pseudo-miracle, dit " *miracle de Josué* ", du nom du célèbre chef hébreu qui, soi-disant, arrêta la course

du Soleil dans le ciel. Les versets XII à XIV, suite du précédent, racontent cet événement extraordinaire :

" C'est alors, au jour où Iahvé livra l'Amorrhéen à la merci des fils d'Israël, que Josué parla à Iahvé et dit, sous les yeux d'Israël : " *Soleil, arrête-toi sur Gabaon et, Lune sur la vallée d'Ayalon* ". Et le Soleil s'arrêta et la Lune stationna, jusqu'à ce que la nation se fût vengée de ses ennemis. Est-ce que ceci n'est pas écrit dans le Livre du Juste ? : " *Le Soleil stationna au milieu des cieux et il ne se hâta point de se coucher, presque un jour entier. Et il n'y eut pas de jour comme celui-là ni avant, ni après lui.* " ... "

Les commentateurs de *la Bible* et les savants objectifs se sont souvent demandé quel avait bien pu être le phénomène capable de provoquer cette prolongation du jour. La première réponse satisfaisante fut celle donnée par l'astronome français Jean Bosler (1878-1973) en 1943 (4). Celui-ci a noté que si l'on se reporte au passage biblique en question, il ne semble pas qu'il y est eu un arrêt effectif du Soleil sur la sphère céleste, phénomène qui eut impliqué une interruption de la rotation terrestre (ce qui est impossible), mais plutôt une simple prolongation du jour nécessaire à l'achèvement de la victoire de Josué. *La Bible* raconte qu'auparavant, il y eut la fameuse chute de pierres qui fit de nombreuses victimes, mais sans voir une relation d'aucune sorte entre les deux événements.

D'après Bosler, ceux-ci étaient liés génétiquement, et il avait raison dans son analyse. En effet, on sait aujourd'hui que ces chutes de pierres s'accompagnent parfois de nuits claires (comme en 1908 avec l'événement de la Toungouska, voir le chapitre 9), c'est-à-dire d'une prolongation inaccoutumée de la durée du jour, due à la diffusion dans la haute atmosphère de poussières solides entraînées par l'essaim ou soulevées par la catastrophe.

On pense de nos jours que le "*miracle de Josué*" a été causé par la désintégration dans l'atmosphère d'un petit astéroïde d'origine cométaire de quelques dizaines de mètres de diamètre, c'est-à-dire un fragment de noyau de comète dégazée. Après sa rupture totale, ce fragment cométaire, qui se composait probablement de glace, de gaz gelés, de matière météoritique et de poussières, a provoqué la diffusion de ces poussières dans l'atmosphère. D'autre part, suite à la fragmentation complète de la matière solide sous forme de pierres plus ou moins grosses, il a été la cause de l'essaim météoritique qui décima les ennemis d'Israël.

Un vrai astéroïde aurait seulement pu causer la chute de pierres célestes, mais pas le "*miracle*". Inversement, une importante éruption volcanique, phénomène parfois évoqué, aurait pu illuminer l'atmosphère et prolonger la durée du jour d'une manière acceptable, mais pas causer la chute de pierres. L'explosion dans l'atmosphère d'un petit noyau cométaire au-dessus de la Judée est le phénomène le plus adéquat pour expliquer valablement cet

intéressant passage biblique. Passage qui a fait couler beaucoup d'encre depuis plus de 3000 ans, notamment du côté des religieux qui, pendant des siècles, ont à toute force voulu croire à *l'impossible* miracle que constitue l'arrêt réel du Soleil sur sa trajectoire céleste.

L'Apocalypse de Saint Jean

Les *apocalypses* étaient un genre littéraire très répandu chez les auteurs de l'Antiquité, dont le but principal était de faire allusion à des personnages ou à des événements historiques passés et présents, mais en même temps, évidemment, de présager l'avenir sous un aspect cataclysmique.

L'Apocalypse de Saint Jean (I^{er} siècle), écrite vers la fin du I^{er} siècle, constitue le dernier livre du *Nouveau Testament* (5). Sa place dans le livre religieux des Chrétiens lui a permis de traverser les siècles sans encombre, et toutes les générations de théologiens l'ont étudié en détail sans en saisir l'un des sens cachés : la réalité de l'impactisme terrestre dans les millénaires précédant l'époque de Saint Jean (6).

Car toutes ces *apocalypses* des auteurs anciens se répétaient l'une l'autre au fil des siècles, chaque auteur, sur un canevas de base, brodant selon ses fantasmes et ses convictions religieuses. Saint Jean n'échappe pas à la règle, il explique la fin du monde à venir, voulue par Dieu, avec de nombreuses allusions à des phénomènes d'origine cosmique, inexplicables selon lui sans la permission de l'Être divin. N'ayant pas été lui-même témoin d'une telle catastrophe, il s'inspire de textes plus anciens qui, eux, se référaient à des événements authentiques d'un lointain passé.

J'étudierai certaines de ces catastrophes aux chapitres 18 et 19 de ce livre, à la lumière des connaissances actuelles, mais il est intéressant de rappeler quelques-unes des citations du prophète, telles qu'elles figurent dans son *Apocalypse*.

ouverture du sixième sceau

" ... il se produisit un grand tremblement de terre : le soleil devint noir comme un sac de crin, la lune devint toute comme du sang, les étoiles du ciel tombèrent sur la terre, comme les figes vertes tombent du figuier secoué par un grand vent ; le ciel se retira comme un livre qu'on roule ; toutes les montagnes et les îles furent changées de place, et les rois de la terre, les grands, les chefs, les riches, les puissants, les esclaves et les hommes libres se cachèrent dans les grottes et les rochers des montagnes... "

(*Apocalypse*, VI, 12, 13, 14, 15)

les sept trompettes, qui sont autant de fléaux

" ... l'ange prit l'encensoir et le remplit du feu de l'autel qu'il jeta sur la terre. Et il y eut des tonnerres, des voix, des éclairs et un tremblement de terre... "

(*Apocalypse*, VIII, 5)

" ... il y eut de la grêle et du feu mêlés de sang qui tombèrent sur la terre, le tiers de la terre fut brûlé, ainsi que le tiers des arbres et de toute herbe verte... "

(Première trompette, *Apocalypse*, VIII, 7)

" ... il tomba dans la mer comme une grande montagne embrasée : le tiers de la mer devint du sang, il mourut le tiers des êtres qui étaient dans la mer et le tiers des navires périt... "

(Seconde trompette, *Apocalypse*, VIII, 8, 9)

" ... il tomba du ciel une grande étoile, ardente comme un flambeau ; elle tomba sur le tiers des fleuves et sur les sources des eaux. Et l'étoile s'appelait Absinthe. Et le tiers des eaux se changea en absinthe et beaucoup d'hommes moururent de ces eaux pour être devenues amères... "

(Troisième trompette, *Apocalypse*, VIII, 10, 11)

" ... le tiers du soleil fut atteint, ainsi que le tiers de la lune et le tiers des étoiles, en sorte que ces astres furent obscurcis d'un tiers et que le jour perdit un tiers de sa clarté et la nuit de même... "

(Quatrième trompette, *Apocalypse*, VIII, 12)

" ... une étoile était tombée du ciel sur la terre, il lui fut donné la clef du puits de l'abîme. Elle ouvrit le puits de l'abîme. Il monta du puits une fumée comme d'une grande fournaise et le soleil et l'air furent obscurcis par la fumée du puits. De la fumée, sortirent sur la terre des sauterelles... Il leur fut donné non de tuer les hommes mais de les tourmenter pendant cinq mois... "

(Cinquième trompette, *Apocalypse*, IX, 1, 2, 3, 5, 11)

" ... le tiers des hommes périt par ces trois fléaux, à savoir le feu, la fumée et le soufre... "

(Sixième trompette, *Apocalypse*, IX, 18)

" le temple de Dieu s'ouvrit dans le ciel... il y eut des éclairs, des voix, des tonnerres, un tremblement de terre et une forte grêle... "

(Septième trompette, *Apocalypse*, XI, 19)

les sept signes

" ... un signe parut dans le ciel : c'était un grand dragon rouge... il balayait le tiers des étoiles du ciel et les jetait sur la terre... il y eut un combat dans le ciel... malheur à la terre et à la mer, car le diable est descendu chez vous, en grande fureur... "

(Premier signe, *Apocalypse*, XII, 3, 4, 7, 12)

" ... la bête de la terre opère de grands prodiges, jusqu'à faire descendre le feu du ciel en terre aux yeux des hommes... "

(Troisième signe, *Apocalypse*, XIII, 13)

les sept coupes de la colère de Dieu

" ... un ulcère malin et pernicieux frappa les hommes... "

(Première coupe, *Apocalypse*, XVI, 2)

" ... la mer devint comme du sang de cadavre et tous les êtres de la mer périrent... "

(Seconde coupe, *Apocalypse*, XVI, 3)

" ... les fleuves et les sources se changèrent en sang... "

(Troisième coupe, *Apocalypse*, XVI, 4)

" ... il fut donné au soleil de brûler les hommes par le feu ; et les hommes furent brûlés dans une grande chaleur... "

(Quatrième coupe, *Apocalypse*, XVI, 8, 9)

" ... le royaume de la bête fut plongé dans les ténèbres et les hommes se mordaient la langue de douleur... "

(Cinquième coupe, *Apocalypse*, XVI, 10)

" ... le grand fleuve de l'Euphrate dont les eaux séchèrent pour livrer passage aux rois de l'Orient... "

(Sixième coupe, *Apocalypse*, XVI, 12)

" ... il y eut des éclairs, des voix et des tonnerres, ainsi qu'un grand tremblement de terre, tel qu'il n'y en a jamais eu d'aussi grand depuis qu'il y a des hommes sur terre... les villes des nations s'effondrèrent... toutes les îles s'enfuirent et les montagnes disparurent. Et des grêlons énormes, comme des talents, s'abattirent du ciel sur les hommes... "

(Septième coupe, *Apocalypse*, XVI, 18, 19, 20, 21)

L'Apocalypse de Saint Jean, qui n'est qu'une apocalypse parmi d'autres, je l'ai dit, est généralement considérée comme un texte dénué de tout fondement sérieux par les commentateurs objectifs. Mais pour un spécialiste de l'impactisme, certains passages sont fort intéressants et utiles, car ils sont caractéristiques d'un des sujets favoris des auteurs anciens.

Contrairement aux auteurs "matérialistes" de l'Antiquité qui voyaient dans la chute d'étoiles sur la Terre un événement purement physique, Saint Jean et les auteurs "déistes" la considéraient, au contraire, comme un moyen de punir les humains choisis par Dieu, seul capable d'après eux de provoquer un tel cataclysme, absolument extraordinaire pour les gens de cette époque.

Les citations de *L'Apocalypse* rappelées ci-dessus semblent correspondre à un agglomérat de catastrophes provenant d'au moins trois événements de nature différente qui se sont produits durant le second millénaire avant J.-C. dans le bassin oriental de la Méditerranée. Je parlerai de ces trois cataclysmes aux chapitres 18 et 19.

Whiston et les comètes instruments de Dieu

Comme je l'ai dit au début de ce chapitre, *la Bible* s'est rapidement imposée comme LE Livre dans le monde christianisé, s'avérant incontournable et extraordinairement dogmatique. Il s'ensuivit une autocensure quasiment obligatoire pour les savants qui auraient eu des vellétés de critique, voire des propositions raisonnables pour expliquer certains phénomènes observables plus adéquates que celles fournies par le livre sacré. On comprend mieux alors qu'il fallut attendre certaines dissidences locales au niveau de la religion pour que quelques savants puissent faire connaître leur "autonomie intellectuelle" et proposer des solutions nouvelles.

Le fait que la "dissidence" (toute partielle) vienne d'Angleterre ne doit donc pas étonner, puisque ce pays avait déjà pris ses distances vis-à-vis de la hiérarchie de Rome. Dissidence partielle, simplement parce que certains esprits, tout à fait révolutionnaires pour l'époque, essayèrent de moderniser la Bible sans la repousser totalement, proposition totalement incongrue mais rendue nécessaire par le fossé qui déjà se creusait d'une façon criante entre la "vérité dogmatique" et la réalité des observations, comme je le montrerai au chapitre suivant.

William Whiston (1667-1747) était un ecclésiastique (il débuta comme simple curé), théologien et mathématicien anglais, contemporain et ami de Edmond Halley (1656-1742) et de Isaac Newton (1642-1727), à qui il succéda à la chaire de mathématiques de Cambridge. Il n'avait que 29 ans en 1696 quand il publia un livre très remarquable intitulé : *A new theory of the Earth (Une nouvelle théorie de la Terre)* (7), qui eut un grand retentissement à l'époque et durant le XVIII^e siècle par son approche tout à fait nouvelle et surtout quasiment impensable venant d'un homme d'église. On peut le considérer comme l'un des tout premiers ouvrages théologico-cosmogonique.

Dès qu'il fut évident, à la suite des travaux historiques de Newton sur la gravitation, que les comètes étaient des membres permanents du Système solaire, au même titre que les planètes, Whiston fut persuadé que Dieu avait utilisé ces composantes du Système solaire comme instruments pour ses divers desseins. L'une de ces comètes avait dû être utilisée pour *la création du monde* et plus tard une autre pour *le Déluge*. Enfin, Whiston pensait que Dieu en utilisera une troisième dans l'avenir pour *détruire le monde*, quand il jugera que l'heure de l'Apocalypse a sonné. Il était d'autre part persuadé que les comètes sont des planètes en train de se former et qu'ainsi toutes les planètes connues sont des anciennes comètes.

Dans son livre, Whiston expliquait ainsi l'origine de la Terre créée par Dieu :

" ... La comète venait de passer en son périhélie fort près du soleil : son noyau avait contracté une chaleur brûlante, c'est la cause de la chaleur centrale, qui subsiste encore aujourd'hui. Il plut au Souverain Maître de l'univers de faire de cette comète une terre habitable ; il diminua la force centrifuge ou tangentielle de la comète, son orbite s'inclina vers le soleil, d'extrêmement excentrique qu'elle était primitivement, elle devenait médiocrement excentrique ; la comète devint planète ; sa révolution autour du soleil fut limitée à un an... L'atmosphère terrestre, ayant dix à onze fois plus de diamètre que le noyau, était composée de deux sortes de parties ; l'une contenait un petit nombre de particules sèches, solides et terreuses, avec une quantité plus petite encore de particules aqueuses et aériennes ; l'autre était un fluide dense et pesant : tout cela était confusément mêlé et formait un vrai chaos. Mais aussitôt que la terre fut devenue planète, toutes ses parties s'affaissèrent proportionnellement à leur gravité spécifique ; ce fluide dense et épais descendit en premier et environna le noyau. L'air, l'eau, les parties terreuses, encore mêlées ensemble, interceptèrent pour quelque temps les rayons solaires ; mais enfin la plus grande partie de la terre et de l'eau s'étant affaissée, comme une croûte sur le fluide dense, l'air devenu moins hétérogène permit le passage aux rayons solaires ; la lumière parut d'abord, telle que nous la voyons lorsque le ciel est couvert de nuages et enfin l'air continuant à s'épurer, le soleil se montra... "

Halley qui étudiait à la même époque, et à la lumière de la nouvelle théorie de la gravitation de Newton, les mouvements de toutes les comètes du passé, constata peu après avec surprise que quatre grandes comètes, celles de 1680, 1106, 531 et 43 avant J.-C. étaient espacées entre elles d'environ 575 ans. Halley crut pouvoir conclure qu'il s'agissait du même astre. Whiston remarqua alors que si l'on multiplie par 4 cette période de 575 ans, on obtient 2300 ans et que compte tenu que la première apparition connue datait de 43 avant J.-C., cette comète avait dû faire une approche à la Terre en 2343 avant notre ère, soit à six ans près la date présumée du Déluge biblique. Ces six années d'écart ne posaient pas vraiment de problème, car elles pouvaient être dues à une période un tout petit peu plus forte (575 ans et demi) ou à des perturbations planétaires. N'oublions pas que Whiston était aussi un mathématicien éminent. On sait depuis longtemps que ces quatre comètes sont en fait des objets distincts et que la pseudo-période de 575 ans n'était qu'une simple coïncidence, mais à l'époque, ni Halley, ni Whiston, ni même Newton qui étaient tous les trois des calculateurs émérites ne doutaient de sa réalité.

Camille Flammarion (1842-1925), dans son *Astronomie populaire* de 1880 raconte fort bien la suite de cette histoire incroyable. Relisons-le (8) :

" ... Whiston se proposait d'expliquer par l'action d'une comète les révolutions géologiques et les événements du récit de la Genèse. Sa théorie était d'abord entièrement hypothétique, ne s'appliquant à aucune comète particulière, mais quand Halley eut assigné à la fameuse comète de 1680 une orbite elliptique parcourue en 575 ans, et que Whiston, remontant dans l'histoire, eut trouvé pour dates de ses apparitions anciennes l'une des époques fixées par les chronologistes pour celle du déluge mosaïque, le théologien astronome n'hésita plus ; il précisa sa théorie et donna à la comète de 1680, non seulement le rôle d'exterminatrice du genre humain par l'eau, mais encore celui d'incendiaire pour l'avenir.

" *Lorsque l'homme eut péché, dit-il, une petite comète passa très près de la Terre, et, coupant obliquement le plan de son orbite, lui imprima un mouvement de rotation. Dieu avait prévu que l'homme pécherait, et que ses crimes, parvenus à leur comble, demanderaient une punition terrible ; en conséquence, il avait préparé dès l'instant de la création une comète qui devait être l'instrument de ses vengeances. Cette comète est celle de 1680* ".
Comment se fit la catastrophe ? Le voici :

Soit le vendredi 28 novembre de l'an de péché 2349, soit le 2 décembre 2926, la comète coupa le plan de l'écliptique de la Terre en un point dont notre globe n'était éloigné que de 3614 lieues. La conjonction arriva lorsqu'on comptait midi sous le méridien de Pékin, où Noé, paraît-il, demeurait avant le déluge. Maintenant, quel fut l'effet de cette rencontre ? Une marée

prodigieuse s'exerça non seulement sur les eaux des mers, mais aussi sur celles qui se trouvaient au-dessous de la croûte solide. Les chaînes des montagnes d'Arménie, les monts Gordiens, qui se trouvaient les plus voisins de la comète au moment de la conjonction, furent ébranlés et s'entrouvrirent. Et ainsi " *furent rompues les sources du grand abîme* ". Là ne s'arrêta pas le désastre. L'atmosphère et la queue de la comète atteignant la Terre et sa propre atmosphère, y précipitèrent des torrents, qui tombèrent pendant quarante jours ; et ainsi " *furent ouvertes toutes les cataractes du ciel* ". La profondeur des eaux du déluge fut, selon Whiston, de près de dix mille mètres...

Maintenant, comment cette comète, qui a noyé une première fois le genre humain, pourra-t-elle nous incendier à une seconde rencontre ? Whiston n'est point embarrassé : elle arrivera derrière nous, retardera le mouvement de notre globe, changera son orbite presque circulaire en une ellipse très excentrique. " *La Terre sera emportée près du Soleil ; elle y éprouvera une chaleur d'une extrême intensité ; elle entrera en combustion. Enfin, après que les saints auront régné pendant mille ans sur la Terre régénérée par le feu, et rendue de nouveau habitable par la volonté divine, une dernière comète viendra heurter la Terre, l'orbite terrestre s'allongera excessivement, et la Terre, redevenue comète, cessera d'être habitable.* "

On ne peut plus dire après cela que les comètes ne servent à rien ! "

On peut se moquer aujourd'hui de Whiston, qui a certes un peu extrapolé avec ses fameuses comètes de la création du monde, du Déluge et de l'Apocalypse. Il est considéré aujourd'hui, à juste titre, comme un rouage important de l'histoire des idées catastrophistes. Il ne faut pas oublier qu'à l'époque de Newton, Halley et Whiston, *la Bible* était encore un livre absolument intouchable. Et elle allait le rester encore quasiment pendant deux siècles.

Mais, comme je l'ai déjà dit plus haut, certains savants clairvoyants, et surtout ceux qui étaient en même temps théologiens, comme Whiston et aussi Newton (9), avaient bien compris qu'il était devenu nécessaire de lui donner un petit côté scientifique capable de sauver des apparences, difficilement acceptables parfois, et ainsi de sauvegarder sa crédibilité. Les créationnistes scientifiques ne font pas autre chose aujourd'hui, en s'appuyant sur les dernières découvertes de l'astrophysique pour faire perdurer, en le mettant au goût du jour, le dogme de la Création.

Whiston, qui était en avance sur son temps, quoi qu'on dise, et qui désirait surtout "moderniser" *la Bible* en la rendant compatible avec des événements scientifiquement reconnus, allait être vilipendé par tous ceux qui ne voulaient même pas penser que cette Bible pût être en erreur ou trop

imprécise sur certains points. On connaît la célèbre réprimande de Buffon (1707-1788) qui en 1749, un demi-siècle plus tard, écrivit dans son *Histoire naturelle*, à l'adresse principalement de Whiston (10) :

" Toutes les fois qu'on sera assez téméraire pour vouloir expliquer par des raisons physiques les vérités théologiques, qu'on se permettra d'interpréter dans des vues purement humaines le texte divin des livres sacrés, et que l'on voudra raisonner sur les volontés du Très-Haut et sur l'exécution de ses décrets, on tombera nécessairement dans les ténèbres et dans le chaos où est tombé l'auteur de ce système. "

On voit que Buffon n'hésitait pas, chaque fois qu'il le pouvait, en chargeant les autres à bon compte, à montrer sa (pseudo) loyauté envers le clergé, souvent suspicieux à son égard (la Faculté de Théologie de la Sorbonne l'obligea même à se rétracter pour avoir "dépassé les bornes" avec sa *Théorie de la Terre*), pour mieux cacher ses propres contradictions avec le texte biblique, et notamment l'âge de la Terre qui lui posait (à juste titre) de gros problèmes.

Cependant, il faut savoir que « lorsqu'aux XVII^e et XVIII^e siècles, quand la science classique fut élaborée, la théologie était au cœur de la pensée de la plupart des savants qui contribuèrent à son édification. » (11). Lorsque les scientifiques et les philosophes des *Lumières* ne "dépassaient pas les bornes", science et théologie faisaient plutôt bon ménage.

La survivance moderne : le créationnisme

Pour bien comprendre le créationnisme sous sa forme primaire (primitive pourrait-on dire), mais que les créationnistes eux-mêmes appellent fondamentaliste, il suffit d'ouvrir l'un des nombreux livres de propagande (et d'endoctrinement) publiés par le "lobby créationniste" et de lire quelques affirmations glanées au fil des pages (12) .

" Il devient de plus en plus évident que l'homme ne parvient pas à éliminer les effets de la dégénérescence consécutive à la rébellion d'Adam.

Tous les faits acquis à la science confirment la Bible, qui parle de la dégénérescence de l'homme. La Bible déclare en effet que l'homme fut créé parfait, mais qu'à cause de sa rébellion contre son Créateur, il a commencé à dégénérer. Son péché marqua le début d'une période de 6000 années de déclin moral et physique. La gravité de cette dégradation peut se mesurer aujourd'hui à l'état dépravé de la société actuelle. Et la situation ne s'améliore pas, tant s'en faut.

Bientôt, Dieu ne permettra plus à Satan d'être le chef invisible du monde. Un cataclysme approche à coup sûr ! L'histoire de l'homme est sur le point de prendre un tournant décisif. "

On voit le niveau de ce genre de littérature ! Sous cette forme, le créationnisme ne cherche pas à évoluer, il s'appuie uniquement sur le texte biblique, vérité intangible. Le Déluge est toujours une certitude. Il est sûr que toute découverte qui dérange est systématiquement écartée et remplacée par le leitmotiv " *Tous les faits acquis à la science confirment la Bible* " (sic !) (13). Plus que les découvertes astronomiques d'ailleurs, c'est le problème de l'évolution qui désespère les créationnistes, comme je l'ai rappelé dans l'introduction. Admettre que l'homme descend du singe est un crève-cœur pour eux, une éventualité satanique tout à fait inacceptable (14).

Le lobby créationniste en Amérique fait un forcing incroyable pour tenter de prouver que la théorie de l'évolution est un mythe sans fondement, inventé de toutes pièces par les ennemis de la religion, et exiger devant les tribunaux américains que les établissements scolaires enseignent également la *théorie de la Création biblique* (16).

Les créationnistes rejoignent par certains côtés les millénaristes (obnubilés, eux, par des problèmes de calendrier qu'ils se créent de toute pièce) et attendent (espèrent peut-être ?) un cataclysme prochain, comme celui prévu par Whiston jadis, ou comme celui carrément annoncé (!) pour 1843 par le prophète américain William Miller (1782-1849), créateur de la secte fondamentaliste des *Millerites*, comme nous le verrons au chapitre suivant.

C'est pour pallier ce côté passéiste, rétrograde même, qui en fin de compte nuit sérieusement à la religion que les créationnistes sont censés préserver et même promouvoir, que certains savants croyants, plus pragmatiques et plus modernes, ont mis au point une parade réellement scientifique : la *science de la Création*. Ces savants, ne considérant plus *la Bible* que comme une allégorie et une source d'inspiration, veulent la remettre au goût du jour, la relifter très sérieusement, en intégrant toutes les découvertes scientifiques modernes au fur et à mesure qu'elles sont acceptées par la communauté scientifique. En présentant leur science de la Création comme une "*Bible moderne*", nettement plus acceptable, le libre arbitre de chacun des nombreux chercheurs qui ont fait le choix de croire en Dieu est ainsi sauvegardé par cette nouvelle approche plus crédible, qui est alors du ressort de la métaphysique, à défaut d'être scientifique. Force est de constater que l'*Intelligent Design* obtient un certain succès en Amérique, grâce à un lobbying de tous les instants.

Nous allons voir l'argumentation de ces rénovateurs dans la dernière section de ce chapitre, une argumentation souvent savamment étayée et qui s'articule principalement selon le schéma biblique des "*sept jours de la Création*", schéma simpliste mais qui garde encore une certaine force chez certains croyants fondamentalistes.

Le dogme renouvelé, ou la science de la Création

Loin des idées fondamentalistes accrochées à un passé définitivement obsolète, *la science de la Création* se veut moderne, apte à "digérer" toute nouveauté scientifique. Aux-États-Unis, elle est aussi connue sous le nom de *Intelligent Design* (16) et connaît un succès sans cesse grandissant auprès d'intellectuels et de scientifiques croyants.

Et il faut dire qu'elle y réussit assez bien, moyennant une "gymnastique intellectuelle" pas toujours évidente. Comme je l'ai dit dans la section précédente, le résultat est choix personnel, religieux, métaphysique et non pas scientifique. Car la science de la Création ne prouve rien, elle tente seulement d'expliquer d'une manière relativement acceptable, dans une optique religieuse, des faits scientifiques prouvés ou des théories et hypothèses plausibles ou en gestation. Ce qui n'est pas la même chose.

Où la science de la Création est la mieux placée, permettant aux yeux de certains le retour de Dieu dans la science (17), c'est l'explication difficile de la naissance de l'Univers à partir de rien (18). Le Big Bang, sous sa forme imaginée par Georges Lemaître (1894-1966), qui était mathématicien mais aussi abbé à l'époque de sa théorie sur l'expansion de l'Univers établie en 1927, a été un bain de jouvence extraordinaire pour le dogme de la Création qui avait perdu toute crédibilité scientifique dans sa version biblique traditionnelle écrite il y a 2500 ans.

Par la suite, pratiquement chaque science a été mise à contribution pour régénérer quelque peu le dogme biblique, comme l'a fort bien expliqué le physicien israélien Nathan Aviezer dans son livre *Au commencement. Création : la Bible et la science* (19). Notamment, les difficiles problèmes d'évolution (incompatibles pour les créationnistes) ont été très habilement contournés par les scientifiques de la Création (à ne pas confondre avec les créationnistes au sens strict). Pour eux, *Homo sapiens* descend de son prédécesseur direct, *l'homme de Néandertal*, mais il a bénéficié " *de dons apparus de façon soudaine* " qui lui ont permis de " *faire preuve immédiatement d'une inventivité technologique et culturelle extraordinaire* ". Pas de problème de filiation particulier, *le singe a été une étape* nécessaire voulue et programmée par Dieu pour arriver à l'homme. Le fait que Dieu ait été obligé de donner quelques nécessaires coups de pouce depuis l'origine des êtres vivants pour arriver à l'homme ne semble pas les déranger.

Ces scientifiques de la Création ont la voie totalement libre pour régénérer la religion qui en avait bien besoin. Tous les problèmes de cataclysmes sont assimilés très facilement en liaison avec les théories scientifiques actuelles. Ainsi la vie terrestre est issue d'une *vie extérieure inséminée* par des molécules biologiques venues de l'espace (là les fondamentalistes doivent hurler !), l'évolution des différentes espèces et leur montée vers la complexité sont liées aux impacts cosmiques qui se sont succédé au cours des dernières centaines de millions d'années sur la Terre (les 6000 ans de l'évêque Ussher

font désormais partie du folklore biblique !), enfin le Déluge a été causé par un impact d'astéroïde ou de comète, il y a quelques milliers d'années. La date de 2349 avant J.-C. (à quelques années près) pourrait être confirmée par les découvertes dendrochronologiques récentes, ce qui serait pour la science de la Création une formidable opportunité pour confirmer sa crédibilité.

Il n'y a pas grand chose à ajouter sur ce sujet. Du créationnisme étroit, obtus, éculé, passéiste, les croyants peuvent, s'ils le désirent et s'ils se sentent près à franchir le pas, évoluer sans problème vers la science de la Création, moderne, inventive, tournée sans complexe vers l'avenir. C'est très bien ainsi, à chacun son choix, mais je rappelle quand même que science tout court et science de la Création sont deux approches totalement différentes. Chacun trouvera dans l'une ou/et dans l'autre ce qu'il cherche.

Mais il ne faut pas se le cacher : les créationnistes purs et durs sont pas dit leur dernier mot. Il faut lire le livre du théologien Jacques Arnould : *Dieu versus Darwin* (20) pour comprendre que foi religieuse et raison scientifique ne sont pas sur la même longueur d'onde !

Notes

1. A.-M. Gerard, *Dictionnaire de la Bible* (Robert Laffont, coll. Bouquins, avec la collaboration de A. Nordon-Gerard et P. Tollu, 1989). Ce dictionnaire de 1500 pages, qui contient 2300 entrées et plus de 50 000 références, est un monument d'érudition, somme de vingt ans de travail pour André-Marie Gerard. Il contient l'essentiel des connaissances sur le sujet accumulées par des générations de chercheurs, théologiens ou autres. Un livre (presque) aussi incontournable que la Bible elle-même !

2. *Le Déluge. La science face au mythe biblique* (Les Cahiers de Science & Vie, n° 72, décembre 2002). Ce très intéressant numéro contient 18 articles traitant des différents aspects du sujet.

3. *La Bible. Ancien Testament* (Gallimard, 1956). Cette remarquable édition de la Bibliothèque de la Pléiade a été publiée sous la direction de E. Dhorme. Introduction par E. Dhorme ; traductions et notes par E. Dhorme, F. Michaéli et A. Guillaumont.

4. J. Bosler, *Sur une averse de météorites mentionnée dans la Bible*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 216, p. 597, 1943.

5. *Le Nouveau Testament* (Éditions de l'École, 1957 ; traduction sur le texte grec et annotations par le Père Buzy).

6. Césaire d'Arles, *L'Apocalypse* (Desclée de Brouwer, 1989 ; traduction par J. Courreau). Ce livre est publié dans la collection " *les Pères dans la foi* ", c'est dire qu'il présente l'Apocalypse en tant que livre religieux. Césaire d'Arles a vécu autour de l'an 500 de notre ère. On voit avec cet auteur que la

notion d'*apocalypse*, nom commun, relative à la prédiction d'événements de nature physique, telle qu'elle était admise au temps des Grecs, a totalement évolué et changé de nature pour devenir *l'Apocalypse*, nom propre, événement religieux annoncé, événement unique. Après Saint Jean, *l'Apocalypse* est devenu un livre symbolique et dogmatique étudié par tous les théologiens.

7. W. Whiston, *A new theory of the Earth* (1696). Dans *La foire aux dinosaures* (Seuil, 1993 ; titre original : *Bully for brontosaurus*, 1991), Stephen Jay Gould, consacre un essai (le n° 25) à Whiston, intitulé *Le parrain de la catastrophe*, dans lequel il entreprend de le réhabiliter.

8. C. Flammarion, *Astronomie populaire* (1880). Cette édition a été publiée en deux tomes. Le livre cinquième (tome 2) est consacré aux comètes et aux étoiles filantes (pp. 193-272). Le passage cité figure pp. 202-203. Dans l'édition refondue de 1955, l'astronome français Fernand Baldet (1885-1964), qui a réécrit le chapitre "Comètes" de l'ouvrage, a conservé le texte de Flammarion (pp. 336-337). Ainsi Whiston et sa comète traversent les siècles. Et c'est tant mieux.

9. I. Newton, *Ecrits sur la religion* (Gallimard, 1996 ; traduction, présentation et notes de J.-F. Baillon). Ce livre présente l'un des aspects les plus mal connus de l'œuvre de Newton : ses écrits religieux. Parallèlement à son activité scientifique, connue et disséquée depuis longtemps, Newton tout au long de sa vie a développé une réflexion théologique. Ses vues étaient proches de celles de Whiston, plus jeune d'un quart de siècle et qui fut pour lui un aiguillon. Il semble bien que Newton était favorable à l'idée maîtresse de Whiston : les comètes "instruments" de Dieu.

10. Buffon, *Histoire naturelle. Théorie de la terre* (1749). Cette diatribe envers Whiston figure au chapitre *Preuves de la Théorie de la terre*, article II : Du système de M. Whiston.

11. R. Locqueneux, *Science classique et théologie*, Vuibert / Adapt-Snes, 2010. Citation p. 4 de couverture. Dans ce livre très intéressant, Robert Locqueneux montre bien que la science et la théologie n'étaient pas forcément antinomiques et que de nombreux savants (mais pas tous) les associaient sans trop de problèmes et d'états d'âme.

12. *L'homme est-il le produit de l'évolution ou de la création ?* (Watchtower Bible and Tract Society of New York, 1969). Titre original : *Did man get here by evolution or by creation* (1967). Les citations retenues figurent aux pages 115 et 172. Ce livre s'appuie sur 248 références soigneusement choisies et provenant principalement de la presse scientifique américaine.

13. En fait, ces nombreux livres procréationnistes retiennent uniquement les informations qui les arrangent, ignorant toutes les autres. C'est assez logique dans la mesure où ce sont des livres de propagande.

14. D. Lecourt, *L'Amérique entre la Bible et Darwin* (PUF, 1992). Ce livre paru dans la collection Science, Histoire et Société raconte fort bien le renouveau des idées créationnistes en Amérique, lié selon Dominique Lecourt " à une contre-offensive du fondamentalisme protestant jugée nécessaire pour prendre le dessus sur les idéaux progressistes et libertaires des années 1960 ". Une lecture passionnante et un peu inquiétante quand même, qui montre clairement que l'évolution des idées est loin d'être linéaire et admise par tous, et qu'elle a même des adversaires acharnés.

15. P.E. Johnson, *Le darwinisme en question. Science ou métaphysique ?* (Pierre d'Angle, 1996). Titre original : *Darwin on trial* (1991). Ce livre, écrit par un juriste américain spécialisé dans les controverses sur l'enseignement du darwinisme en Amérique, s'efforce de démontrer que le darwinisme est une "religion" et qu'il ne repose en fait sur aucune base scientifique sérieuse. L'évolution darwinienne est la bête noire des créationnistes américains (il leur est insupportable que l'homme puisse descendre du singe !), d'autant plus qu'ils ont décelé des faiblesses dans la théorie plus que centenaire de Darwin.

16. W. Dembski, *Intelligent design : The bridge between science and theology* (InterVarsity Press, 2002).

17. Dossier " *Comment Dieu a créé le monde* ", Valeurs Actuelles, n° 3030, décembre 1994.

18. M. Cassé, *Du vide et de la création* (Odile Jacob, 1993).

19. N. Aviezer, *Au commencement. Création : la Bible et la science* (MJR, 1994). Edition originale en langue anglaise parue en 1990 sous le titre : *In the Beginning : Biblical Creation and Science* (éditeur : Ktav Publishing House). Un livre magistral et une mine d'or inespérée pour les scientifiques de la Création. Nathan Aviezer est un physicien israélien très intéressé par les problèmes scientifiques et religieux qu'il essaie de réconcilier. Il est devenu un maître à penser pour les croyants qui ne veulent pas ignorer les réalités scientifiques.

20. J. Arnould, *Dieu versus Darwin* (Albin Michel, 2007). Jacques Arnould est un dominicain, théologien et historien des sciences. Ce livre consacré au créationnisme et aux puissants lobbies qui le soutiennent est sous-titré : " *Les créationnistes vont-ils triompher de la science ?* " Après avoir lu ce livre, on peut effectivement se poser la question.

CHAPITRE 3

LA GRANDE ÉPOQUE DES CATASTROPHISTES

Kepler, Newton et Halley domptent les astres

Avec la disparition de Claude Ptolémée (v. 90-168), dernier héritier de la tradition scientifique grecque, commença une très longue période de ténèbres, pour ne pas dire d'obscurantisme, dominée par une religion omniprésente et inflexible, et durant laquelle les progrès dans le domaine des idées furent quasi nuls. Les quelques rares érudits qui survolèrent cette époque n'avaient pas la voix assez forte pour se faire entendre ! L'Inquisition était toute puissante et ils risquaient leur vie. Ce n'est qu'à la Renaissance qu'apparurent enfin quelques "phares" qui permirent de faire éclater un univers médiéval désespérant de médiocrité intellectuelle (1/2).

Nicolas Copernic (1473-1543), d'abord, qui enleva la Terre du centre du monde pour y installer le Soleil (très longtemps après Aristarque de Samos). Tycho Brahe (1546-1601), ensuite, qui observa la fameuse supernova de 1572 et qui montra avec la grande comète de 1577 que les comètes ne faisaient pas partie du monde sublunaire (très longtemps après Sénèque). Et surtout, Johannes Kepler (1571-1630), premier géant de la pensée, génial, complexe et mystique (3) qui mit à mal le dogme du mouvement circulaire pour les planètes et démontra avec ses trois lois immortelles que les astres du Système solaire sont liés à leur Soleil, autour duquel ils décrivent des ellipses. Galilée (1564-1642), fondateur de la mécanique moderne et premier utilisateur de la lunette astronomique découvrit, lui, les quatre satellites principaux de Jupiter et les cratères lunaires, qui dès 1610 auraient pu lui permettre de comprendre la réalité de l'impactisme planétaire.

Ces cratères lunaires furent les premiers témoins de tous ces cataclysmes du passé dont disposèrent les astronomes. En 1647, Johann Hevelius (1611-1687), brasseur et astronome allemand, publia sa *Sélénographie*, première cartographie de la surface lunaire, et en 1668, dans sa *Cométographie*, il suggéra que les comètes décrivent des trajectoires paraboliques ou hyperboliques autour du Soleil. Vers la même époque, Christiaan Huygens (1629-1695) découvrit la vraie nature de l'anneau de Saturne, autre vestige d'un drame cosmique, issu de la désintégration d'un satellite s'étant approché trop près de sa planète mère.

Mais c'est, bien sûr, Isaac Newton (1642-1727), "l'architecte des forces cosmiques", avec ses travaux sur la gravitation et ses trois lois (le principe d'inertie, la loi d'accélération et la loi d'action-réaction) qui fut le point culminant de cette révolution des idées entamée avec Copernic, puisqu'il fut en mesure de relier la dynamique et l'astronomie. Ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, publiés en 1687, lui permirent

définitivement de dompter les astres, explicitant les trois lois de Kepler d'une façon lumineuse, et de montrer que les comètes sont bien des composants réguliers du Système solaire au même titre que les planètes.

Son contemporain, ami et financier Edmond Halley (1656-1742) se signala principalement par ses travaux sur les comètes. Dans son *Synopsis d'astronomie cométaire*, paru en 1705, il indiqua pour la première fois que les comètes apparues en 1531, 1607 et 1682 (cette dernière observée par lui) étaient trois passages différents d'une même comète périodique dont il calcula l'orbite et prédit le retour pour 1758. Cette découverte essentielle lui permit de rendre son nom immortel, et "sa" comète, la fameuse entre toutes comète P/Halley, devint un objet d'étude pour tous les spécialistes ultérieurs.

C'est à la même époque qu'apparut le premier *astronome* catastrophiste, William Whiston (1667-1752), qui s'appuya sur les travaux de Newton et Halley. Tout était désormais en place pour une nouvelle génération de savants désireux d'étudier d'une manière plus scientifique l'origine de la Terre et ses rapports avec l'Univers environnant.

Ainsi donc, en un peu plus d'un siècle et demi, grâce au génie de quelques scientifiques de haute lignée, l'image du monde fut à jamais transformée. La Terre perdit sa place au centre de la Création, pour ne plus devenir qu'une planète parmi d'autres, au grand dam des Églises, qui comprirent vite que chaque idée vraiment nouvelle représentait une menace pour le pouvoir établi, en l'occurrence celui de l'omniprésente religion. Chaque fois qu'elles furent en mesure de le faire, ces Églises tentèrent de mettre le holà à toute forme de dissidence caractérisée (4). On connaît surtout la navrante histoire de Giordano Bruno (1548-1600), qui voulut prôner à travers toute l'Europe l'infinité de l'Univers et la pluralité des mondes planétaires, et qui fut arrêté par l'Inquisition en 1593 et brûlé vif sept ans plus tard comme hérétique. Mais d'autres furent menacés, à commencer par Galilée.

Théories de la Terre, Déluge et catastrophisme

Les *théories de la Terre* ont été nombreuses au XVII^e et XVIII^e siècles, écrites par des savants essayant progressivement de percer les secrets de la création ou de la nature, selon que leur objectif principal était d'expliquer l'œuvre de Dieu, d'analyser et de comprendre les mécanismes de la nature, ou même de tenter une synthèse des deux, synthèse qui sera tentée à plusieurs reprises.

On en compte une bonne trentaine, certaines ayant plus ou moins surnagé figurent dans les livres sur l'histoire de la géologie, alors que d'autres n'ont pas survécu à leurs auteurs. Bien sûr, aucune n'était parfaite, mais globalement ce genre mi-littéraire/mi-scientifique est intéressant sur le plan historique, au même titre que les *apocalypses* de l'Antiquité. Ces théories de la Terre, vues sous des angles parfois très différents, ont permis le brassage de nombreuses idées, parfois remarquables et novatrices, mais parfois aussi

démentielles et dénuées de tout fondement. Je vais en dire quelques mots, en passant sous silence de nombreux noms que l'on peut retrouver dans les livres spécialisés (5/6).

C'est René Descartes (1596-1650) qui tenta le premier de rendre compte par des lois physiques de la formation de la Terre, dans son livre *Le Monde*, écrit en 1633 (7), mais qui ne parut qu'après sa mort en 1664, et dans les 3^e et 4^e parties de ses *Principes philosophiques* parus en 1644. Descartes a surtout eu le mérite d'introduire l'idée d'évolution, progrès fondamental par rapport à l'ancien monde éternel qui avait force de loi depuis la fin de l'Antiquité. Evolution pour lui voulait bien dire que tous les objets de l'Univers naissent, vivent et meurent. On connaît sa théorie et ses célèbres tourbillons. Pour lui, la Terre était un soleil devenu obscur qui avait connu une évolution catastrophiste. Les historiens de la géologie considèrent son système comme étant la première théorie de la Terre, à laquelle allaient se référer, ou s'inspirer, nombre de savants ultérieurs.

Le monde de 6000 ans de l'archevêque Ussher

Peu de temps après la mort de Descartes, se produisit un événement qui aurait pu rester anecdotique, mais qui en fait allait prendre une importance considérable. C'est la publication en 1658 du livre *The annals of the world* (*Les annales du monde*) par l'archevêque irlandais James Ussher (1581-1656), dans lequel il annonçait tout simplement que Dieu avait créé la Terre le samedi 22 octobre 4004 av. J.-C. à huit heures du soir. Ussher était parvenu à ce résultat à la suite d'une étude complète des dates puisées aux différentes chronologies de l'Ancien Testament.

Cette affirmation toute personnelle de Ussher plut à l'éditeur de la version "King James" de *la Bible* qui l'inséra comme note marginale dans les éditions ultérieures. Cette circonstance fit accepter la date de 4004 av. J.-C. comme faisant corps avec le dogme religieux et elle devint quasiment la date "officielle" de la Création, à laquelle tout le monde, scientifiques y compris, était obligé de se référer sous peine d'être accusé d'hérésie, avec tous les désagréments que cela pouvait comporter.

Dès cette époque, les géologues furent donc, eux aussi, obligés de se plier à la nouvelle orthodoxie religieuse et à son corollaire difficilement soutenable : faire entrer l'histoire physique du monde en 6000 ans seulement, ce qui était vraiment bien court. C'est cette difficulté bien inutile qui allait déboucher sur une chronologie courte que toutes les observations sur le terrain semblaient pourtant contredire. Mais aux XVII^e et XVIII^e siècles, on ne pouvait éluder facilement le dogme de la Création et les géologues durent faire avec, redoublant d'ingéniosité pour vivre avec ce redoutable "fil à la patte" que leur avait passé l'archevêque Ussher. Ingéniosité tournée par la suite un peu facilement en dérision par des successeurs d'une autre époque, débarrassés à tout jamais de Ussher et de son monde de 6000 ans, et devenue " naïveté, fable, fantaisie débridée, élucubration grotesque, idolâtrie biblique " et autres qualificatifs du même genre sous la plume d'auteurs

imbus de modernisme et toujours persuadés de détenir LA vérité, en fait leur vérité qu'ils voulaient imposer aux autres.

Bible et science : une difficile cohabitation

C'est le révérend (un ecclésiastique donc) Thomas Burnet (1635-1715), qui fut le premier de ces géologues à proposer une théorie de la Terre dans son célèbre ouvrage en latin et en quatre volumes *Telluris theoria sacra* (8), paru entre 1680 et 1689. Stephen Jay Gould (1941-2002) lui a consacré une partie entière de son livre *Aux racines du temps* (9) pour faire connaître son œuvre et surtout le réhabiliter. Dans ce livre, Burnet, qui s'inspirait fortement de Descartes, dont il était en fait un disciple, essayait de réinterpréter l'enseignement de la Bible avec des arguments rationalistes, notamment le récit de la Genèse. Il proposa une version "scientifique" du Déluge et devint ainsi le premier des *diluvianistes*, qui allaient être vilipendés par leurs successeurs qui se considéraient comme plus modernes et qui refusaient "de faire de la science un roman". Pour Burnet, le Déluge fut à la fois un phénomène physique et un châtement divin, envoyé par Dieu pour punir une humanité corrompue.

Burnet fut un véritable novateur et il fit rapidement des émules. Comme je l'ai expliqué au chapitre précédent, son compatriote Whiston, qui lui était astronome, lui emboîta le pas, en 1696, avec *A new theory of the Earth*, en faisant des comètes les instruments de Dieu. Pour lui, les comètes étaient en mesure de tout faire : la Terre elle-même était une ancienne comète, une autre avait causé le Déluge et dans l'avenir (proche pour Whiston) elle détruira la vie sur la Terre. Son idée fut reprise souvent par la suite jusqu'au XIX^e siècle, principalement par les créationnistes, pour expliquer le Déluge. On peut même dire que si on l'expurge des à-côtés inutiles et de toute la partie religieuse, elle "tient encore la route", comme je le montrerai tout au long de ce livre.

A la même époque que Whiston, Gottfried Leibniz (1646-1716) terminait son *Protogée* (10), qui ne fut publié que beaucoup plus tard (en 1749). On sait que chez l'illustre philosophe et mathématicien, les idées du savant, du métaphysicien et du théologien étaient trois aspects différents d'une même pensée. Pour lui, le Créateur a créé le monde selon un modèle cohérent fondé sur une harmonie préétablie et notre histoire n'est que le développement d'un projet divin. Leibniz innovait, dans la mesure où il considérait que toutes les catastrophes subies par la Terre et l'humanité n'étaient pas des actes négatifs (!), elles s'inséraient simplement dans un projet d'ensemble, obligatoirement positif à long terme, puisque voulu et programmé par Dieu. L'épisode du Déluge était un événement parmi d'autres, venu à son heure quand Dieu l'avait jugé nécessaire. On peut rire de Leibniz. Là encore, il n'empêche qu'il avait compris bien avant les autres que les catastrophes ne sont pas obligatoirement négatives à long terme. On ne dit pas autre chose aujourd'hui, trois siècles plus tard, puisque l'on sait que les catastrophes sont souvent des forces de création, dans la mesure où

elles peuvent libérer des niches écologiques auparavant fort encombrées, et qu'elles sont parfois une source majeure de l'évolution des espèces.

Un autre diluvianiste, suisse celui-là, Johann-Jakob Scheuchzer (1672-1733) (11) proposa "d'éclairer la Bible par la science". Son gros ouvrage : *Physica sacra* (huit volumes entre 1730 et 1735), paru en français sous le titre *Physique sacrée ou Histoire naturelle de la Bible*, s'annonçait ouvertement comme une approche théologique des phénomènes naturels. Vaste programme, à une époque où, au contraire, commençait à se tracer une frontière entre le savoir scientifique, basé uniquement sur l'observation et l'analyse, et l'exégèse religieuse, beaucoup plus crispée sur sa doctrine intangible. Scheuchzer considérait les fossiles comme des "reliques du Déluge" et sa collection était connue de tous les spécialistes européens. D'après lui, seul un déluge pouvait expliquer la distribution des fossiles que l'on trouvait parfois au sommet des montagnes. Avant la théorie de la tectonique des plaques qui explique parfaitement ce phénomène, une telle présence restait totalement inexplicable en dehors de l'appoint d'un déluge qui aurait recouvert provisoirement l'ensemble de la planète, montagnes comprises.

La Terre, une planète vieille

Buffon (1707-1788) reste l'un des grands noms de l'histoire des sciences de la nature (12). On le considère souvent comme l'un des pères de la théorie catastrophiste et également comme l'un des premiers évolutionnistes de renom. En fait, il fut uniquement catastrophiste pour ce qui concerne la *formation* de la Terre. Pour ce qui est de son *évolution* ultérieure, il était résolument transformiste, c'est-à-dire partisan des causes actuelles, et ne croyait pas du tout aux catastrophes, comme d'autres savants de l'époque.

En 1749, dans son *Histoire naturelle*, il émit l'hypothèse que le Soleil avait été heurté dans le passé par une comète géante qui lui avait arraché un important filament de matière, à partir duquel se seraient formées ultérieurement les planètes du Système solaire dont la Terre, qui serait âgée d'après lui de près de 80 000 ans. Buffon parlait aussi de l'origine de la vie et de ses idées transformistes. Tout cela lui valut un sévère rappel à l'ordre de la Faculté de Théologie de la Sorbonne, qui l'obligea à une rétractation. Comme Descartes, un siècle plus tôt, il ne se sentait nullement une âme de martyr, et redoutait surtout en insistant de perdre le bénéfice d'une vie dorée à laquelle, semble-t-il, il était fort attaché. Après cette alerte, Buffon opéra lui-même pour sa sécurité une autocensure de ses écrits pendant plus d'un quart de siècle.

Heureusement, sous l'impulsion des *Encyclopédistes*, et notamment celle du baron d'Holbach (1723-1789), matérialiste militant qui fit campagne pour démontrer que " *la religion était l'ennemie de la science* ", les choses s'améliorèrent sensiblement, au grand bénéfice de l'évolution des idées. Bon gré, mal gré, l'Église accepta de desserrer quelque peu le carcan dogmatique qui empêchait la science de respirer.

Cela permit à Buffon, en 1778, à une époque nettement plus favorable, de revenir sans crainte de censure intempestive, sur ses deux sujets d'étude favoris qu'étaient la Terre et la vie qu'elle abrite. Dans *Les époques de la nature* (13), son livre le plus achevé, réflexion d'une longue carrière de naturaliste éclectique, il présenta un système géologique complet, mais qui est considéré aujourd'hui " *davantage comme une synthèse du passé que comme une contribution à la science de l'avenir* ".

Pour finir ce survol sur les théories de la Terre, il faut citer le géologue écossais James Hutton (1726-1797), considéré souvent comme le fondateur de la géologie, et qui posa le premier les bases de l'uniformitarisme. Dans sa *Theory of the Earth*, parue en 1788, il montra, preuves à l'appui, que la Terre était une planète vieille. Une étude sur le terrain durant des années l'avait conforté dans son idée que les causes des événements du passé étaient les mêmes que celles qui agissaient encore de nos jours. Ce concept allait être repris longtemps après et développé par Lyell. Mais à l'époque de Hutton, la majorité des savants n'étaient pas encore prêts à les accepter. Au contraire, l'ère du catastrophisme commençait, grâce surtout à un événement unique, imprévu, qui allait faire évoluer radicalement les mentalités : l'approche très serrée d'une comète à la Terre. Cet événement est un jalon important dans l'évolution des idées catastrophistes.

La comète de Lexell, une révélation

L'histoire de cette comète (14) est révélatrice de la montée en puissance des idées catastrophistes au siècle des *Lumières*, et elle fut un jalon important dans la connaissance des comètes venant à proximité immédiate de la Terre. On sait qu'elle impressionna fortement des scientifiques du calibre de Laplace et de Cuvier.

D/Lexell (= 1770 L1) fut en fait découverte par Charles Messier (1730-1817), l'infatigable "chasseur de comètes", le 14 juin 1770. Le 1^{er} juillet, elle passa à exactement 2,26 millions de kilomètres de la Terre (0,0151 UA). Elle était très brillante (avec une magnitude négative $m = -1,3$ au maximum) et très rapide dans le ciel, du fait de sa proximité, caractéristiques qui en firent un astre particulièrement terrifiant pour la population, toujours apeurée dès qu'il se présente un phénomène céleste sortant de l'ordinaire.

Cette comète fut un véritable casse-tête pour les spécialistes de mécanique céleste, habitués à calculer pour ce type d'astres des orbites paraboliques qui, en règle générale, donnaient de bons résultats sur la partie de l'arc proche du Soleil. Rien de tel avec D/Lexell, cette comète se montrait rétive à tout calcul. C'est l'astronome suédois Anders Lexell (1740-1784) qui trouva la raison de cette anomalie. Pour la première fois, on se trouvait en présence d'une comète à courte période, avec un demi-grand axe largement inférieur à celui de Jupiter ($a = 3,15$ UA). Les astronomes se posèrent alors la question suivante : " *Comment se fait-il qu'on ne l'ait jamais observée auparavant ?* " Ce n'est que bien plus tard qu'on put répondre à cette question, dont je reparlerai en détail au chapitre 7 consacré aux comètes.

D/Lexell fut utilisée pour la première fois pour calculer la masse des comètes qui était jusque-là totalement indéterminée. Les perturbations causées à la Terre furent tout à fait insignifiantes (elles furent même nulles, on le sait aujourd'hui). Laplace en conclut que la masse de cette comète était au plus égale à 5/1000 de celle de la Terre (en réalité, elle était beaucoup moins massive que cela). Les comètes n'étaient donc pas des planètes de masse comparable à la nôtre, en dépit de leur éclat parfois impressionnant, comme le pensaient encore Buffon et certains astronomes de l'époque, mais des corps célestes beaucoup plus petits. Leur danger n'en était cependant pas nul, loin de là même, si leur taille était kilométrique, car le *facteur vitesse* était un élément très important à prendre en compte. Leur vitesse à la distance de la Terre se chiffre très souvent à plus de 30 km/s, et même plus du double en cas d'orbite rétrograde, comme pour P/Halley notamment. Le danger des comètes, présent dans l'esprit des foules incultes depuis toujours, entrainait dans celui des astronomes et des mathématiciens, et plus généralement dans celui des autres scientifiques et des érudits non scientifiques. Tous se demandèrent : " *Et si Whiston avait raison ? Et si le Déluge avait bien été causé par une comète ?* "

Le catastrophisme cométaire, avec l'approche à la Terre de D/Lexell, allait prendre son véritable démarrage, sous une forme bien plus élaborée, pluridisciplinaire. Mais les créationnistes y trouvaient également leur compte, car comme l'avait expliqué Whiston, les comètes pouvaient être l'instrument de Dieu, pour exécuter certains de ses desseins destructeurs (Déluge, Apocalypse). Leibniz l'avait fort bien rappelé dans ses écrits : nous vivons dans un monde qui a été programmé par Dieu, et des catastrophes intermédiaires sont indispensables pour conduire à la perfection finale.

Laplace, un grand astronome catastrophiste

Le premier retour calculé de la comète de Halley, qui passa au périhélie le 12 mars 1759, eut un retentissement extraordinaire parmi les astronomes de l'époque. Pierre-Simon Laplace (1749-1827), notamment, enfant à l'époque des calculs d'Alexis Clairaut (1713-1765), le mathématicien qui mit le problème en équations, fut impressionné par la précision et l'importance de la prédiction, qui mettait fin à des siècles d'obscurantisme. Dans son *Exposition du système du monde*, Laplace rappelle ce qui a changé (15) :

" Remarquons à l'avantage des progrès de l'esprit humain, que cette comète qui dans le dernier siècle, a excité le plus vif intérêt parmi les géomètres et les astronomes, avait été vue d'une manière bien différente, quatre révolutions auparavant, en 1456. La longue queue qu'elle traînait après elle, répandit la terreur dans l'Europe déjà consternée par les succès rapides des Turcs qui venaient de renverser le Bas-Empire ; et le pape Calixte ordonna des prières publiques, dans lesquelles on conjurait la comète et les Turcs. On était loin de penser, dans ces temps d'ignorance, que la nature obéit toujours à des lois immuables. Suivant que les phénomènes arrivaient et se succédaient avec

régularité, ou sans ordre apparent, on les faisait dépendre des causes finales, ou du hasard ; et lorsqu'ils offraient quelque chose d'extraordinaire et semblaient contrarier l'ordre naturel, on les regardait comme autant de signes de la colère céleste. "

Onze ans après le passage de P/Halley, se produisit l'approche record de D/Lexell à la Terre. Comme tous les astronomes de l'époque, Laplace fut très impressionné par la faiblesse de la distance entre les deux astres, car on ignorait encore à l'époque la faible masse des comètes, en aucune mesure comparable à celle des planètes. Il comprit qu'à l'échelle astronomique, des collisions entre la Terre et des comètes étaient inévitables. Laplace devint un catastrophiste convaincu, mais en prenant bien soin de considérer le *facteur temps* comme un paramètre essentiel :

" Aux frayeurs qu'inspirait alors l'apparition des comètes, a succédé la crainte que dans le grand nombre de celles qui traversent dans tous les sens le système planétaire, l'une d'elles ne bouleverse la Terre. Elles passent si rapidement près de nous, que les effets de leur attraction ne sont point à redouter : ce n'est qu'en choquant la Terre qu'elles peuvent y produire de funestes ravages. Mais ce choc, quoique possible, est si peu vraisemblable dans le cours d'un siècle ; il faudrait un hasard si extraordinaire, pour la rencontre de deux corps aussi petits relativement à l'immensité de l'espace dans lequel ils se meuvent, que l'on ne peut concevoir, à cet égard, aucune crainte raisonnable. Cependant, la petite probabilité d'une pareille rencontre peut, en s'accumulant pendant une longue suite de siècles, devenir très grande. "

Laplace fut un modèle et un inspirateur pour tous les catastrophistes qui allaient suivre, notamment Cuvier et ses disciples. On ne peut être plus clair que dans ce texte célèbre de Laplace qui fait suite au précédent :

" Il est facile de se représenter les effets de ce choc avec la Terre. L'axe et le mouvement de rotation changés ; les mers abandonnant leur ancienne position pour se précipiter vers le nouvel équateur ; une grande partie des hommes et des animaux, noyés par ce déluge universel, ou détruits par la violente secousse imprimée au globe terrestre ; des espèces entières anéanties ; tous les monuments de l'industrie humaine, renversés ; tels sont les désastres que le choc d'une comète a dû produire, si sa masse a été comparable à celle de la Terre. On voit alors pourquoi l'Océan a recouvert de hautes montagnes, sur lesquelles il a laissé des marques incontestables de son séjour ; on voit comment les animaux et les plantes du midi ont pu exister dans les climats du nord où l'on retrouve leurs dépouilles et leurs empreintes ; enfin, on explique la nouveauté du monde moral dont les monuments certains ne remontent pas au-delà de cinq mille ans. L'espèce humaine réduite à un petit

nombre d'individus et à l'état le plus déplorable, uniquement occupée pendant très longtemps du soin de se conserver, a dû perdre entièrement le souvenir des sciences et des arts ; et quand les progrès de la civilisation en ont fait sentir de nouveau les besoins, il a fallu tout recommencer, comme si les hommes eussent été placés nouvellement sur la Terre. Quoi qu'il en soit de cette cause assignée par quelques philosophes, à ces phénomènes, je le répète, on doit être rassuré sur un aussi terrible événement, pendant le court intervalle de la vie, d'autant plus qu'il paraît que les masses des comètes sont d'une petitesse extrême, et qu'ainsi leur choc ne produirait que des révolutions locales. Mais l'homme est tellement disposé de recevoir l'impression de la crainte, que l'on a vu en 1773 la plus vive frayeur se répandre dans Paris, et de là se communiquer dans toute la France, sur la simple annonce d'un mémoire dans lequel Lalande déterminait celles des comètes observées, qui peuvent le plus approcher de la Terre ; tant il est vrai que les erreurs, les superstitions, les vaines terreurs et tous les maux qu'entraîne l'ignorance, se reproduiraient promptement, si la lumière des sciences venait à s'éteindre. "

Cette approche de D/Lexell, qui reste l'approche record, comme nous le verrons au chapitre consacré aux comètes, aura été le premier véritable détonateur sur la réalité possible d'un impactisme et d'un catastrophisme cométaires, si bien popularisés par Laplace, dont l'influence intellectuelle et scientifique était grande à la fin du XVIII^e siècle.

D'autres astronomes contemporains de Laplace, comme Jean Sylvain Bailly (1736-1793) (16) et Jérôme Lalande (1732-1807), partageaient des idées assez identiques aux siennes, même s'ils étaient obligés de mettre une sourdine à leurs opinions exprimées. Comme le rappelle le texte de Laplace ci-dessus, Lalande fut ouvertement accusé de faire peur aux gens et de provoquer la panique par ses écrits (!), alors qu'il ne faisait que publier quelques données chiffrées bien réelles.

En cette fin de XVIII^e siècle, période révolutionnaire s'il en fût, le "danger extérieur", qui longtemps avait eu une base purement affective, due essentiellement à la peur ancestrale des comètes et à un obscurantisme larvé mais omniprésent, prenait forme et consistance (avec la détermination des causes et des conséquences possibles) grâce à l'appui de quelques scientifiques de renom.

D'autant plus, comme nous allons le voir, qu'après des décennies de doute, et même d'une certaine manière de recul par rapport aux opinions précédentes, la réalité des chutes de météorites allait s'imposer d'une manière irréversible.

Les météorites, des pierres tombées du ciel

Au chapitre 10, je traiterai en détail des météorites et de leurs chutes. Mais il est utile de parler ici des circonstances qui ont permis de les reconnaître comme une réalité. Un progrès très important, décisif même, qui fut très longtemps contesté et même nié avec véhémence par des savants de grande envergure. Deux noms sont liés historiquement à cette reconnaissance, ceux de Chladni et de Biot, mais on pourrait leur ajouter celui de Pallas qui les précéda dans l'identification d'un objet extraterrestre.

Le refus de croire à une réalité millénaire

Avec l'arrivée du *siècle des Lumières*, le récit sans cesse renouvelé et actualisé de nombreuses chutes de pierres postérieures à celle, fameuse entre toutes, d'Ensisheim de 1492, devint vite "obscurantisme moyenâgeux" pour tous ces esprits éclairés, philosophes et scientifiques, qui voulaient "refaire le monde", et pour qui il était devenu quasiment indispensable de dénigrer systématiquement toutes les survivances d'un passé obsolète pour paraître moderne.

" Fables de paysans que ces récits, fruit de la superstition, ne cesse-t-on de répéter au XVIII^e siècle ! En 1771, Johann Wolfgang Goethe (1749-1832), qui étudiait le droit à Strasbourg, fit le voyage d'Ensisheim pour examiner la fameuse pierre et couvrit de sarcasmes la "crédulité du genre humain". Il refusa d'y voir autre chose qu'une pierre ordinaire. " (17)

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les savants nièrent d'une façon obtuse l'évidence, en maudissant à l'instar de Goethe cette " *crédulité du genre humain* ". Cette étroitesse d'esprit des savants de l'époque sur ce sujet précis (le siècle des Lumières a heureusement donné lieu à des progrès incontestables dans d'autres domaines) paraît absurde de nos jours, quand on sait que plusieurs dizaines de chutes de météorites ont été recensées pour ce seul XVIII^e siècle (18), dont plusieurs en France (Carpentras en 1738, Nicorps en 1750, Luponnas en 1753, Lucé en 1768, Aire-sur-la-Lys en 1769, Barbotan en 1790 et Salles en 1798). Pourtant, en 1792, dans un rapport à l'Académie des Sciences, le chimiste Lavoisier (1743-1794) affirmait encore, sans aucun complexe, que les aérolithes n'étaient rien d'autre que des pierres ordinaires altérées par la foudre.

Heureusement, des voix discordantes se firent jour. Quelques chercheurs un peu plus clairvoyants se démarquèrent de ce satisfecit général de "modernisme" que se décernaient, un peu facilement, les érudits des Lumières. Ils voulaient rester, eux, sur le strict terrain de l'observation et de l'analyse scientifique, et ne se satisfaisaient pas du credo pseudo-scientifique expliquant que la chute de pierres venant du cosmos (et non pas de l'atmosphère) était une impossibilité physique.

Le premier, le naturaliste d'origine allemande Pierre-Simon Pallas (1741-1811), qui a donné à juste titre son nom aux pallasites, décrivit la célèbre météorite, découverte en 1749 au sud de Krasnojarsk en Sibérie, et dont la masse avoisinait les 700 kg. En 1772, il la fit transporter, non sans mal on s'en doute, de Sibérie à Saint-Pétersbourg. Il comprit vite que cette superbe "éponge de fer" comme il l'appela ne pouvait être que d'origine cosmique.

Un verrou psychologique difficile à briser

En 1794, le physicien allemand Ernst Chladni (1756-1827), après avoir examiné plusieurs rapports concernant notamment la pallasite sibérienne et la sidérite argentine de Campo del Cielo, publia en allemand son fameux petit livre (19), révolutionnaire pour l'époque, dans lequel il apportait les premières preuves chimiques et minéralogiques du caractère exotique (c'est-à-dire extraterrestre) des spécimens étudiés.

La même année, le 16 juin 1794, à 19 heures, succédant à une violente détonation dans l'atmosphère, tombait à Sienne en Toscane, une pluie de petites pierres observée par de nombreux témoins. Là encore l'évidence était flagrante, mais les scientifiques se bouchèrent les yeux.

Quatre ans plus tard, le 19 décembre 1798, à 20 heures, c'était au tour de la région de Bénarès, en Inde, d'être le point de chute d'une nouvelle pluie de pierres, faisant suite à l'apparition d'un brillant météore et de détonations dans l'atmosphère, les trois phases ayant des centaines de témoins.

En 1802, le jeune chimiste anglais Edward Howard (1774-1816) (20), après avoir examiné à son tour plusieurs nouveaux objets tombés du ciel (notamment des spécimens de la chute de Bénarès) et mis pour la première fois en évidence la présence de chondres (dans ce que l'on appellera plus tard des *chondrites*), confirma que les météorites étaient différentes chimiquement des pierres terrestres et étaient donc d'origine cosmique.

En 1803, trois scientifiques français, Laplace, Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et Denis Poisson (1781-1840), c'est-à-dire un ancien, catastrophiste convaincu comme nous l'avons vu, et deux jeunes sans complexes, conscients qu'il était plus que l'heure de prendre le train en marche, proposèrent une nouvelle hypothèse : ces pierres venues du ciel seraient en fait des éjectas de volcans lunaires qui auraient pu échapper à l'attraction de notre satellite. Cette hypothèse restrictive eut un certain succès et concurrença l'hypothèse purement cosmique au cours de la première moitié du XIX^e siècle.

Mais malgré toutes ces observations indiscutables et sans cesse renouvelées, et le réveil bien tardif de quelques-uns, secoués heureusement par la génération montante, la communauté scientifique dans sa grande majorité restait hermétique à cette "révolution des idées" indispensable. Le verrou psychologique anti-météorites aura été l'un des plus difficiles à faire sauter, résistant près d'un siècle aux preuves les plus flagrantes, alors que de

nombreuses découvertes importantes, comme celles notamment de la septième planète, Uranus, en 1781, par William Herschel (1738-1822), et de la huitième, Cérès, en 1801, par Giuseppe Piazzi (1746-1826) (21), avaient pourtant montré que le dogme millénaire et intangible des six planètes (les astres errants) n'était rien d'autre qu'un mythe et que le ciel était en fait beaucoup plus complexe que celui prévu par les Anciens.

1803 : la chute de pierres de L'Aigle, le tournant décisif

Le tournant décisif est associé à la fameuse pluie de pierres de L'Aigle dans le département de l'Orne, en Normandie. C'est elle qui permit enfin la reconnaissance "officielle" des chutes de pierres par la communauté scientifique de l'époque, hostile dans sa grande majorité. Elle eut lieu le 26 avril 1803, à 13 heures. Devant plusieurs centaines de témoins éberlués mais nullement incrédules, 2000 à 3000 pierres tombèrent du ciel, dans une zone elliptique de 11 x 4 km. La plus grosse d'entre elles pesait environ 9 kg, alors que le poids total des fragments récupérés n'excédait pas 37 kg. La grosse majorité des pierres était donc de tout petits fragments, dont beaucoup furent ramassés par les témoins tout de suite après la chute, " *alors qu'ils étaient encore chauds et sentaient le soufre* ", comme ils le racontèrent à Jean-Baptiste Biot.

C'est ce physicien français, âgé de 29 ans seulement à l'époque, et qui venait juste d'être nommé membre titulaire de l'Académie des sciences, qui fut officiellement chargé par le gouvernement de l'époque, dirigé par Jean Chaptal (1756-1832), qui était avant tout un chimiste et qui s'intéressa personnellement à l'affaire, d'aller enquêter sur place, suite à la chute de pierres, dont l'écho et quelques spécimens étaient parvenus très vite à Paris.

Dans un rapport célèbre (22), publié en 1806 seulement, et constamment utilisé depuis lors par tous les auteurs qui ont traité du sujet, Biot a raconté en grand détail tout ce qu'il a appris des multiples témoins qu'il a lui-même interrogés et par son enquête minutieuse sur le terrain. Il visita plus de vingt hameaux dispersés dans la zone d'impact et entendit partout la même histoire.

" Le mardi 6 floréal an 11 [26 avril 1803] vers une heure après-midi, le temps étant serein, on aperçut de Caen, de Pont-Audemer et des environs d'Alençon, de Falaise et de Verneuil, un globe enflammé d'un éclat très brillant, et qui se mouvait dans l'atmosphère avec beaucoup de rapidité.

Quelques instants après on entendit à L'Aigle et autour de cette ville, dans un arrondissement de plus de trente lieues de rayon, une explosion violente qui dura cinq ou six minutes.

Ce furent d'abord trois ou quatre coups semblables à des coups de canon, suivis d'une espèce de décharge qui ressemblait à une

fusillade ; après quoi on entendit comme un épouvantable roulement de tambour. L'air était tranquille et le ciel serein, à l'exception de quelques nuages, comme on en voit fréquemment.

Ce bruit partait d'un petit nuage qui avait la forme d'un rectangle, et dont le plus grand côté était dirigé est-ouest. Il parut immobile pendant tout le temps que dura le phénomène ; seulement les vapeurs qui le composaient s'écartaient momentanément de différents côtés par l'effet des explosions successives. Ce nuage se trouva à peu près à une demi-lieue au nord-nord-ouest de la ville de L'Aigle : il était très élevé dans l'atmosphère ; car les habitants de la Vassolerie et de Boislaville, hameaux situés à plus d'une lieue de distance l'un de l'autre, l'observèrent en même temps au-dessus de leurs têtes. Dans tout le canton sur lequel ce nuage planait on entendit des sifflements semblables à ceux d'une pierre lancée par une fronde, et l'on vit en même temps tomber une multitude de masses solides exactement semblables à celles que l'on a désignées sous le nom de pierres météoriques...

Les plus grosses pierres sont tombées à l'extrémité sud-est du grand axe de l'ellipse, du côté de Fontenil et de la Vassolerie ; les plus petites sont tombées à l'autre extrémité, et les moyennes entre ces deux points. D'après ces considérations précédemment rapportées, les plus grosses paraîtraient être tombées les premières !

La plus grosse de toutes celles que l'on a trouvées pesait 8,5 kg (17 livres $\frac{1}{2}$), au moment où elle tomba ; la plus petite que j'ai vue et que j'ai rapportée avec moi, ne pèse que 7 ou 8 grammes (environ 2 gros) ; cette dernière est donc environ mille fois plus petite que la précédente. Le nombre de toutes celles qui sont tombées peut être évalué à deux ou trois mois mille...

On en conclura sans le moindre doute que le fait sur lequel ces preuves se réunissent est réellement arrivé, et *qu'il est tombé des pierres aux environs de L'Aigle le 6 floréal an 11...* "

Biot terminait ainsi son rapport :

" Je me suis borné dans cette relation à un simple exposé des faits ; j'ai tâché de les voir comme tout autre les aurait vus, et j'ai mis tous mes soins à les présenter avec exactitude. Je laisse à la sagacité des physiciens les nombreuses conséquences que l'on en peut déduire, et je m'estimerai heureux s'ils trouvent que j'ai réussi à mettre hors de doute un des plus étonnants phénomènes que les hommes aient jamais observés. "

Biot restait assez prudent dans son rapport. Pour lui, en fait, L'Aigle ne changeait rien, puisqu'il s'était déjà récemment reconverti et penchait avec Laplace et Poisson pour une origine lunaire des météorites. Jeune académicien, il voulait sans doute éviter de se mettre à dos les autres membres plus anciens, et surtout beaucoup plus conservateurs, de l'Académie des sciences qui, eux, avaient déjà fait connaître à maintes reprises leur opinion définitive sur le sujet : " *Les météorites ne peuvent pas exister car il n'y a pas de pierres dans le ciel* ". Bon gré, mal gré, tous finirent quand même par accepter ce qui ne pouvait plus être nié sans tomber dans le ridicule : la réalité de la chute de pierres sur la Terre. L'Aigle marque, à cet égard, un tournant décisif.

Je précise que cette pluie de pierres, somme toute assez banale, hormis son importance historique et épistémologique considérable, concernait des chondrites ordinaires de type L6, c'est-à-dire des pierres qui ne pouvaient être différenciées des pierres terrestres que par des spécialistes. Les pierres du ciel ressemblaient comme des sœurs à celles qui jonchent notre planète !

Cuvier, catastrophiste et fixiste

Georges Cuvier (1769-1832), l'un des fondateurs de la paléontologie, est également le plus célèbre représentant de la théorie des catastrophes (on l'a baptisé le "*prophète du catastrophisme absolu* ") et, avec le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778), le plus célèbre représentant du fixisme (ou fixité des espèces). Du fait d'une éducation religieuse stricte (il était protestant), Cuvier croyait à la véracité du texte biblique qui excluait toute évolution des espèces. Dès ses premiers écrits, en 1795, alors qu'il avait 26 ans, il fut un partisan convaincu de la doctrine des catastrophes successives, sous l'influence du naturaliste allemand Johann Blumenbach (1752-1840), l'un de ses professeurs à Stuttgart, qui enseignait déjà la théorie des catastrophes en liaison avec celle des "espèces perdues". Cuvier ne fut donc pas le premier, loin de là, à soutenir des idées catastrophistes, mais c'est à lui qu'il revint de donner à cette théorie nouvelle une dimension planétaire.

Il s'inspira également des idées de certains de ses devanciers, notamment de celles de Buffon et surtout de Laplace. Pour étayer sa conception catastrophiste des créations multiples, il dut avoir recours à des "révolutions du globe" au cours desquelles toute vie était supprimée.

" Chacune de ces créations, disait Cuvier, a dû trouver une fin abrupte dans un cataclysme universel. A la suite de sa théorie, Cuvier devait évidemment recourir à une nouvelle échelle des temps géologiques, car 6000 ans c'était bien insuffisant pour une nouvelle création, à plus forte raison pour trois. Heureusement, il trouva une nouvelle échelle qui lui convenait, celle de son compatriote Buffon. Cuvier devait être enchanté de la trouver suffisamment longue pour inclure facilement ses trois

créations additionnelles et les cataclysmes qui avaient mis fin à celles-ci.

En substance, la théorie de Cuvier déclarait que Dieu avait créé le monde il y a environ 80 000 ans et le peupla d'animaux de la première création, principalement des poissons et autres habitants des mers et nombre d'amphibiens primitifs. Après le premier cataclysme, une seconde création eut lieu, principalement des reptiles. Mais Dieu n'en fut pas plus satisfait que de la première et, après un second cataclysme, une troisième création eut lieu, consacrée celle-là aux mammifères exclusivement. Finalement, un troisième cataclysme, suivi de la création biblique, amena l'apparition du premier homme et des divers types de plantes et d'animaux que nous connaissons aujourd'hui. Ces derniers étaient destinés à rester sous la domination de l'homme jusqu'à ce que Dieu en sa sagesse décide de répéter l'œuvre de liquidation.

Sans presque s'en douter, Cuvier venait d'établir la théorie des ères géologiques et d'ouvrir la voie aux synthèses qui allaient suivre. Cette tâche fut achevée peu de temps après sa mort par deux hommes parmi les plus illustres dans l'histoire des sciences naturelles, le géologue Charles Lyell et le naturaliste Charles Darwin. " (23)

Ainsi Cuvier recensait quatre créations différentes, en liaison avec les quatre grandes ères géologiques qui avaient été mises en évidence progressivement par les géologues à la suite d'études nombreuses sur le terrain.

Dans son livre classique, *Discours sur les révolutions de la surface du globe* (24/25), Cuvier a montré que ces "révolutions" ont été nombreuses et subites. Il faut citer quelques extraits, car même si certaines données sont un peu dépassées, le fond reste d'actualité et mérite d'être rappelé.

" ...Les changements dans la hauteur des eaux n'ont pas consisté seulement dans une retraite plus ou moins graduelle, plus ou moins générale ; il s'est fait diverses irrptions et retraites successives, dont le résultat définitif a été cependant une diminution universelle de niveau...

Ces retraites répétées n'ont point toutes été lentes, ne se sont point toutes faites par degrés ; au contraire, la plupart des catastrophes qui les ont amenées ont été subites ; et cela est surtout facile à prouver pour la dernière de ces catastrophes, pour celle qui par un double mouvement a inondé et ensuite remis à sec nos continents actuels, ou du moins une grande partie du sol qui les forme aujourd'hui. Elle a laissé encore dans les pays du Nord des cadavres de grands quadrupèdes que la glace a saisis, et qui se sont conservés jusqu'à nos jours avec

leur peau, leur poil et leur chair. S'ils n'eussent été gelés aussitôt que tués, la putréfaction les aurait décomposés. Et d'un autre côté, cette gelée éternelle n'occupait pas auparavant les lieux où ils ont été saisis ; car ils n'auraient pas pu vivre sous une pareille température. C'est donc le même instant qui a fait périr les animaux et qui a rendu glacial le pays qu'ils habitaient. Cet événement a été subit, instantané, sans aucune gradation, et ce qui est si clairement démontré pour cette dernière catastrophe ne l'est guère moins pour celles qui l'ont précédée. Les déchirements, les redressements, les renversements des couches plus anciennes ne laissent pas douter que des causes subites et violentes ne les aient mises en l'état où nous les voyons ; et même la force des mouvements qu'éprouva la masse des eaux est encore attestée par les amas de débris et de cailloux roulés qui s'interposent en beaucoup d'endroits entre les couches solides. La vie a donc été souvent troublée sur cette Terre par des événements effroyables. Des êtres vivants sans nombre ont été victimes de ces catastrophes : les uns, habitants de la terre sèche, se sont vus engloutis par des déluges ; les autres, qui peuplaient le sein des eaux, ont été mis à sec avec le fond des mers subitement relevé ; leurs races même ont fini pour jamais, et ne laissent dans le monde que quelques débris à peine reconnaissables pour le naturaliste... "

(Chapitre : *Preuves que ces révolutions ont été subites*).

Cuvier n'a jamais voulu varier de sa ligne de conduite, décidée dès la fin de ses études. On se doute bien que cette rigidité intangible masquait mal certaines observations indiscutables contraires à sa théorie et on comprend facilement que le naturaliste Lamarck (1744-1829), son grand rival, adepte du *transformisme*, qui travaillait, lui, sur les Invertébrés, finit par l'emporter dans leur combat scientifique qui marqua l'histoire des sciences de la première partie du XIX^e siècle. Cuvier qui avait en partie raison, sur le volet catastrophisme, s'est fourvoyé lui-même en imposant parallèlement un créationnisme totalement dénué de fondement.

Cette position rigide de Cuvier, son fixisme et le créationnisme qui en découle ont fait beaucoup de tort au catastrophisme, comme je l'ai expliqué dans l'introduction, à tel point que le terme même de catastrophisme, qui a collé à la peau de Cuvier pendant 150 ans, doit passer par une période de réhabilitation, que les découvertes actuelles, heureusement, vont permettre de raccourcir au minimum.

Les disciples de Cuvier et les créations multiples

Le catastrophisme et le fixisme de Cuvier, donc son acceptation d'une chronologie courte, ont eu une conséquence utile. Plusieurs intellectuels de l'époque ont pensé qu'il était possible d'associer certains mythes anciens

avec des cataclysmes terrestres d'origine cosmique, notamment avec l'impact de comètes, comme le pensait Whiston, ou avec des fragments de la planète brisée entre Mars et Jupiter dont on connaissait déjà quatre exemplaires découverts entre 1801 et 1807 (Cérès, Pallas, Junon et Vesta).

C'est l'historien des mythes allemand Johann-Gottlieb Radlof (1775-1846) qui, le premier, publia en 1823 un livre sur le sujet : *The shattering of the great planets Hesperus and Phaethon* (26). Selon lui, ces deux planètes avaient causé de multiples destructions sur la Terre et les déluges signalés dans les différentes mythologies. Son travail fut cependant assez vite oublié, mais Radlof allait inspirer tous les catastrophistes ultérieurs.

On sait que Cuvier est resté dans le vague (on comprend pourquoi) au sujet des mécanismes qui déterminent l'apparition de nouvelles espèces. Dans certains cas, il suggéra des migrations pour des catastrophes partielles, mais il ne put échapper au processus de créations nouvelles, nécessitant donc une intervention divine, bien qu'il n'ait rien écrit à ce sujet.

Certains de ses disciples franchirent le pas, comme Alcide d'Orbigny (1802-1857), le plus célèbre d'entre eux, qui n'hésita pas à parler de *27 créations* indépendantes et successives, correspondant aux 28 étages stratigraphiques qu'il avait mis en évidence à l'occasion de ses travaux géologiques (27). Il considérait qu'à la fin de chacune de ces périodes, la faune existante avait été anéantie par le mouvement prolongé des eaux qui avaient recouvert la Terre pendant plusieurs mois, sinon plusieurs années.

Ces créations multiples, on s'en doute, posaient des problèmes, comme l'a bien noté l'historien de la géologie Gabriel Gohau (28) :

" L'idée même de ces créations dérangeait tout le monde. Les incroyants, bien sûr, n'acceptaient pas ces actes divins renouvelés. Mais les chrétiens stricts n'étaient pas moins gênés, car on ne voyait pas bien Dieu s'y reprenant à plusieurs fois. D'autant que comme le remarque Marcel de Serres (1783-1862), paléontologue et géologue montpelliérain, si l'on admet, d'une part, que les créations sont de plus en plus parfaites, et, d'autre part, qu'elles se poursuivront dans l'avenir, il en résulte que l'homme n'est pas " *le terme et le chef-d'œuvre* " de la Création divine. "

La religion, dont n'ont jamais voulu s'affranchir des chercheurs du calibre de Cuvier et d'Orbigny, et aussi beaucoup d'autres moins en pointe, a été un fléau qui empêche d'apprécier dans toute leur richesse le travail scientifique de ces savants. En particulier, d'Orbigny est toujours ridiculisé aujourd'hui avec ses 27 créations successives, il est même devenu le prototype du fixiste borné. Mais quand on regarde plus objectivement, en parallèle, toutes ses "créations" avec les étages géologiques correspondants, on se rend compte qu'il avait fort bien compris le problème des discontinuités dans l'histoire de la Terre et la disparition des faunes et des espèces à chacune d'entre elles.

En voulant rajouter un volet religieux à son travail, d'autant plus superflu que totalement dénué de fondement, il a perdu une place honorable dans l'histoire des sciences et a, en contrepartie, gagné malheureusement cette connotation de dérision attachée à son nom pour les siècles futurs. Bonne raison, pour les savants d'aujourd'hui, d'y regarder à deux fois avant d'introduire inconsidérément une divinité quelconque dans leurs travaux. Quand ils sont bons, ces travaux se suffisent largement à eux-mêmes. Le cas de ce pauvre d'Orbigny devrait servir d'exemple.

Parmi les disciples et successeurs importants de Cuvier, il convient de citer également le géologue écossais Roderick Murchison (1792-1871) qui s'intéressa particulièrement aux débuts de l'histoire de la vie. Il découvrit que tous les groupes importants étaient apparus quasi simultanément au début de la période cambrienne. En créationniste convaincu, il pensait que c'était le moment où Dieu avait décidé de peupler la Terre.

Le recul des idées catastrophistes

Le triomphe de l'uniformitarisme

Quoi qu'il en soit, les excès des successeurs et disciples de Cuvier, après ceux de Cuvier lui-même, et leur manque manifeste de discernement, firent un tort terrible à la doctrine du catastrophisme qui perdit rapidement du terrain face à la doctrine concurrente de l'*uniformitarisme*. Du coup, le catastrophisme, délaissé par les scientifiques, fut récupéré par les milieux religieux, notamment par les fondamentalistes ravis de l'aubaine, pour redonner un peu de tonus et de crédibilité au dogme (au mythe en fait) de la Création. C'est la raison pour laquelle, le catastrophisme avait si mauvaise presse pour les savants de la première moitié du XX^e siècle qui ne le considéraient plus que comme un concept religieux et non comme une théorie scientifique. Ce n'est qu'en fin de XX^e siècle, qu'il a pu, très progressivement, grâce aux travaux concordants de multiples chercheurs des diverses disciplines concernées, retrouver une connotation réellement scientifique.

On doit à Charles Lyell (1797-1875), le géologue écossais considéré comme l'un des plus grands noms de la géologie, la reconnaissance définitive du temps profond, c'est-à-dire la prise en compte de l'immensité du temps géologique (et astronomique), et qui en définit le concept dans son grand ouvrage classique *Principles of geology* (3 volumes de 1830 à 1833). C'est la fameuse théorie de l'*uniformitarisme*. Il postulait sur la base d'observations incontestables que les événements du passé étaient dus aux mêmes causes que celles qui opèrent actuellement, principalement sous l'action d'agents tels que l'eau, le vent et le Soleil. Comme Hutton l'avait laissé entendre quarante ans plus tôt, Lyell affirmait donc que les événements du passé expliquent ceux d'aujourd'hui et que les catastrophes préconisées par Cuvier et d'autres n'ont pas leur place dans l'histoire de la nature et qu'elles n'y ont joué aucun rôle majeur. Il fut le fossoyeur du catastrophisme en tant que théorie scientifique.

Comme l'a rappelé, un peu vite, Stephen Jay Gould (1941-2002) dans son livre *Aux racines du temps* (29) :

" Avec cette magistrale somme de données sur la vitesse et le mode de déroulement des phénomènes géologiques normaux, Lyell fera triompher ses idées et démontrera que l'action lente et continue des causes présentes pouvait, étendue sur une immense durée, produire l'ensemble des événements géologiques (de la formation du Grand Canyon aux extinctions massives). Désormais, ceux qui étudiaient la Terre pouvaient répudier les agents miraculeux rendus indispensables par la compression chronologique de la Bible. La découverte du temps profond dans cette thèse consacre l'une des grandes victoires de l'observation et de l'objectivité sur l'idée préconçue et l'irrationnel. "

La grande victoire de l'observation dont parle Gould n'était en fait que celle dont disposaient les chercheurs de l'époque, c'est-à-dire une observation extraordinairement parcellaire. Quant aux "agents miraculeux", il suffit de comparer les quatre astéroïdes connus à l'époque de Lyell : Cérès, Pallas, Vesta et Junon circulant sagement entre Mars et Jupiter avec les centaines de NEA découverts chaque année et qui viennent régulièrement frôler la Terre. C'est aussi cela la relativité du temps. Rejeter le catastrophisme comme Lyell l'a fait (bien légèrement) pour imposer pour plus d'un siècle un uniformitarisme triomphant, mais qui ne représente qu'un aspect d'un problème beaucoup plus complexe, a fait retarder considérablement la connaissance du monde physique dans lequel nous vivons (il s'était passé la même chose avec le triomphe du géocentrisme de Ptolémée qui a éclipsé pour plus de 1500 ans l'héliocentrisme d'Aristarque de Samos).

Pousser aux oubliettes des données qui paraissent erronées est aujourd'hui encore chose courante. Mais gare au retour de bâton que ne manqueront pas de nous asséner les scientifiques des siècles futurs !

L'irrationnel dont Gould semble accuser les catastrophistes était en fait l'appui malheureux sur la Bible et la théologie dont se prévalaient plus ou moins ouvertement certains chercheurs. Mais leur vision d'*un monde discontinu* était bien le reflet d'une réalité objective, malheureusement noyée dans un galimatias religieux (fixisme, créations, etc.) associé à l'époque. La religion pesait encore trop lourd.

Le catastrophisme récupéré par les sectes religieuses

L'abandon progressif, mais irréversible, du catastrophisme par les scientifiques (30), après la victoire de Lyell et de son uniformitarisme, permit à l'irrationnel religieux de marquer des points sérieux, notamment aux Etats-Unis. Les sectes fondamentalistes ont toujours été nombreuses dans ce pays, s'appuyant sur le texte biblique "pur et dur", c'est-à-dire avec une Création datant de 6000 ans, le Déluge et une fin du monde à venir.

L'une des plus célèbres de ces sectes au XIX^e siècle fut celle des *Millerites* (31), du nom de son fondateur et animateur William Miller (1782-1849). Celui-ci s'était persuadé que le Christ devait revenir sur Terre en 1843 (!). Il prêcha la fin du monde à partir de 1831, liée à une comète, reprenant en cela l'idée de Whiston. Il eut de la chance puisque dès 1833, dans la nuit du 12 au 13 novembre, eut lieu l'extraordinaire averse météorique des *Léonides* (32/33), durant laquelle plus de 200 000 météores furent dénombrés en quelques heures seulement. Il présenta cet inoubliable événement comme un signe avant-coureur, adressé aux hommes par Dieu, du Jour du Jugement dernier attendu pour dix ans plus tard.

En 1843 justement, parut une formidable comète dans le ciel et qui frôla le Soleil (34), la fameuse Grande comète de Mars, qui fut visible à l'œil nu en plein jour. Miller triomphait déjà (un peu trop vite !), persuadé que cette comète était celle du Jugement dernier. Malheureusement pour lui, à aucun moment cette belle comète ne s'approcha de la Terre. La fin du monde était repoussée à l'année suivante, en 1844, puis encore plus tard !

L'exemple des *Millerites* montre comment les créationnistes purent récupérer à leur profit une théorie abandonnée par les scientifiques eux-mêmes. On comprend mieux pourquoi la notion même de catastrophisme a encore si mauvaise presse. Mais sa réhabilitation est irréversible.

Notes

1. J.-R. Roy, *L'astronomie et son histoire* (Masson, 1982).
2. L.M. Celnikier, *Histoire de l'astronomie* (Lavoisier, 1996).
3. J. Kepler, *Le secret du monde* (Gallimard, 1984 ; traduction et notes de A. Segonds). Il suffit de lire ce livre de jeunesse de Kepler : le *Mysterium cosmographicum*, écrit en 1595, à l'âge de 24 ans, et paru l'année suivante à Tübingen, pour comprendre son génie et son anticonformisme. L'histoire des sciences a peu connu de savants du calibre de Kepler. Dans son livre *Dieu face à la science* (Fayard, 1997), Claude Allègre lui rend un hommage appuyé (et parfaitement mérité) : " *L'œuvre de Kepler est l'acte décisif, fondateur de l'astronomie, et peut-être même de toute la science moderne* " (citation p. 62).
4. J. Gapaillard, *Et pourtant, elle tourne ! Le mouvement de la Terre* (Seuil, 1993).
5. G. Gohau, *Histoire de la géologie* (La découverte, 1987). Un livre très intéressant et instructif qui retrace les différents épisodes de l'histoire de la géologie en remontant à l'Antiquité.
6. J. Roger, *Pour une histoire des sciences à part entière* (Albin Michel, 1995 ; texte établi par C. Blankaert, avant-propos de M.-L. Roger et postface de J. Gayon).

7. La condamnation de Galilée par l'Inquisition en 1633 poussa Descartes à repousser la publication de sa théorie, qui ne pouvait que déplaire à l'Église. Descartes ne se sentait pas l'âme d'un martyr, on le comprend !
8. T. Burnet, *Telluris theoria sacra* (Théorie sacrée de la Terre) (1680-1689). Cet ouvrage en latin fut publié en quatre volumes. Le premier était consacré au déluge, le deuxième au paradis originel, le troisième à la consommation du monde par le feu dans les temps à venir et le quatrième aux nouveaux cioux et à la nouvelle Terre. En 1691, il parut une version en anglais de cet ouvrage, sous le titre *Sacred theory of the Earth*.
9. S.J. Gould, *Aux racines du temps* (Grasset, 1990). Titre original : *Time's arrow, time's cycle* (1987).
10. G.W. Leibniz, *Protogaea* (Presses universitaires du Mirail, 1993 ; traduction de B. de Saint-Germain ; édition, introduction et notes de J.-M. Barrande). Cette édition moderne du texte de Leibniz a comme sous-titre : " *De l'aspect primitif de la terre et des traces d'une histoire très ancienne que renferment les monuments mêmes de la nature* ". Ce texte écrit en 1690-91 ne fut publié qu'en 1749.
11. C. Cohen, *Le destin du mammouth* (Seuil, 1994).
12. G. Gohau, *Les sciences de la Terre aux XVII^e et XVIII^e siècles. Naissance de la géologie* (Albin Michel, 1990).
13. J. Roger, *Buffon - Les époques de la nature* (Editions du Muséum, 1988). Un livre indispensable pour comprendre les idées de cette époque. La longue introduction de cette *édition critique* de Jacques Roger est l'œuvre d'un érudit qui a disséqué sans complaisance le travail de Buffon.
14. D.K. Yeomans, *Comets. A chronological history of observation, science, myth, and folklore* (John Wiley & Sons, 1991). Un des livres de référence sur l'histoire des comètes.
15. P.-S. Laplace, *Exposition du système du monde* (Fayard, 1984 ; collection Corpus des œuvres de philosophie en langue française). Cette réédition du classique de Pierre-Simon Laplace est conforme à l'édition de 1835. La première édition de ce livre parut en 1796.
16. Jean-Sylvain Bailly (1736-1793), surtout connu comme homme politique, mêlé de très près à la Révolution (il fut le premier maire de Paris et finit sur l'échafaud), fut aussi un remarquable astronome qui a écrit plusieurs livres sur l'histoire de l'astronomie. Il croyait fermement aux grands cataclysmes du passé (notamment à celui qui aurait détruit l'Atlantide) et il peut être considéré comme un des grands catastrophistes du XVIII^e siècle. Cuvier l'avait en grande estime.

17. Texte du philosophe Dominique Lecourt dans l'Introduction (p. 12) du livre du météoricien français Michel Maurette, *Chasseurs d'étoiles* (Hachette - La Villette, 1993).

18. M.H. Hey, *Catalogue of meteorites*, third edition (British Museum, 1966). Un livre-catalogue très remarquable qui détaille la totalité des chutes de météorites connues ou soupçonnées depuis l'origine. Les mises à jour ultérieures n'ont fait que l'actualiser.

19. E.F.F. Chladni, *Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen* (1794). Chladni s'est mis à dos le monde scientifique de l'époque avec la publication de ce livre, qui n'était pourtant simplement que le reflet de la réalité, dure à admettre par beaucoup.

20. J.G. Burke, *Cosmic debris. Meteorites in history* (University of California Press, 1986).

21. En fait, cette huitième planète, la fameuse *planète 28* prévue par la loi de Titius-Bode, baptisée Cérès, ne s'avéra n'être qu'un astéroïde, le premier d'une série qui n'aura jamais de fin (plus de 600 000 sont connus fin 2012). On sait aujourd'hui qu'une planète unique entre Mars et Jupiter n'a jamais pu exister, les perturbations causées par la planète géante interdisant une concentration de matière unique. Quelques mini-planètes (des astéroïdes dits primaires) ont existé mais toutes, sauf Cérès, Pallas et Vesta, ont subi des fracturations sévères, desquelles ont résulté des familles d'astéroïdes. En 2006, Cérès est devenue officiellement une *planète naine* (*dwarf planet* en anglais). On considère aujourd'hui que seulement huit astres du Système solaire sont des vraies planètes, Pluton étant également considérée comme une planète naine.

22. J.-B. Biot, *Relation d'un voyage fait dans le département de l'Orne, pour constater la réalité d'un météore observé à l'Aigle le 6 floréal an 11* (Mémoires de la classe des sciences, mathématique et physique, Institut National de France, pp. 224-266, 1806). La lecture de ce document, tout au moins dans une forme préliminaire, avait été faite dès 1803 (le 17 juillet) à l'Académie des sciences. Il semble que Biot n'était pas très pressé de publier son rapport, qui obligatoirement allait être diffusé dans le monde entier, puisque celui-ci n'a paru imprimé qu'en 1807 seulement.

23. R. Cunningham, *Histoire de la Terre* (Payot, 1956). Titre original : *A guide to Earth history*. Citation pp. 72-73.

24. Ce grand classique du catastrophisme est paru, dès 1812, comme introduction au grand ouvrage de Cuvier sur les ossements fossiles, sous le titre : " *Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes. Discours préliminaire* ". Il est paru sous sa forme définitive, en 1825 seulement, sous le titre : " *Discours sur les révolutions de la surface du globe et sur les changements qu'elles ont produits dans le monde animal* ". Ces deux versions distantes de treize ans sont en fait assez différentes dans la forme. Sur le

fond, elles sont quasiment identiques. On sait que Cuvier n'a jamais changé dans sa doctrine jusqu'à sa mort en 1832.

25. Deux rééditions françaises récentes ont traité, l'une de la première version (1812), l'autre de la version définitive (1825). Ce sont : 1. G. Cuvier, *Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes. Discours préliminaire* (GF-Flammarion, 1992 ; présentation, notes et chronologie par P. Pellegrin) et 2. G. Cuvier, *Discours sur les révolutions de la surface du globe* (Christian Bourgeois, 1985 ; préface de H. Thomas et postface de G. Laurent).

26. J.G. Radlof, *The shattering of the great planets Hesperus and Phaethon*. Ce livre publié en allemand pour la première fois à Berlin en 1823 a été traduit en anglais par Ami de Grazia et publié en 2006 par Eumetron Publications. Ami de Grazia est l'épouse d'Alfred de Grazia.

27. A. d'Orbigny, *Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphique* (1849-1852).

28. G. Gohau, *Histoire de la géologie*, op. cit., citation p. 171.

29. S.J. Gould, *Aux racines du temps*, op. cit., citation p. 20.

30. C. Babin, *Autour du catastrophisme* (Vuibert - Adapt, 2005). Un excellent petit livre qui détaille les différentes phases de l'histoire du catastrophisme. On y retrouve tous les principaux noms qui ont laissé leur empreinte dans cette théorie scientifique, quasiment moribonde dans la seconde partie du XIX^e siècle et la première moitié du XX^e siècle, et laissée inconsiderément en pâture aux catastrophistes religieux.

31. B.E. Schaeffer, *Comets that changed the world*, Sky and Telescope, pp. 46-51, may 1997.

32. R. Sanderson, *The night of raining fire*, Sky and Telescope, pp. 30-36, november 1998.

33. M. Littmann, *The heavens on fire : the great Leonid meteor storms* (Cambridge University Press, 1998). Le célèbre essaim de météores des *Léonides*, associé à la comète périodique 55P/Tempel-Tuttle, a trouvé son historien avec Mark Littmann (1939), un astronome américain déjà auteur d'un remarquable *Planets beyond. Discovering the outer Solar system* (John Wiley & Sons, 1988).

33. *La Grande Comète de Mars* est liée au groupe de Kreutz dont je parle en détail au chapitre 7. Cette famille de comètes est particulièrement caractéristique de la rapide désintégration d'une comète de grande taille, brisée pour s'être approchée trop près du Soleil, et qui en quelques millénaires peut générer plusieurs dizaines de milliers de fragments de toute taille. En une dizaine d'années seulement, la sonde *SOHO* en a repéré plus

d'un millier, tous issus de la même comète mère, connue sous le nom de *comète d'Aristote*.



Pierre-Simon Laplace (1749-1827)



Georges Cuvier (1769-1832)

Figure 3. Deux grands savants catastrophistes : Laplace et Cuvier

Laplace et Cuvier ont personnifié, par leurs écrits restés célèbres, le catastrophisme de la fin du XVIII^e et du début du XIX^e siècle. Laplace, qui ne croyait pas en Dieu, privilégiait le raisonnement, les observations et le calcul, alors que Cuvier, d'éducation protestante, croyait en la véracité du texte biblique. Il fut par la force des choses fixiste et sectaire, et par là même précipita la fin du catastrophisme, qui devint après lui une théorie religieuse plutôt que scientifique.

CHAPITRE 4

IMPACTISME ET CATASTROPHISME AUJOURD'HUI

Découvertes importantes durant la traversée du désert

La montée de l'uniformitarisme a entraîné le déclin des idées catastrophistes et débouché pour celles-ci sur une "traversée du désert" de plus d'un siècle. Cela ne veut pas dire pour autant que quelques chercheurs isolés, marginalisés souvent, n'aient pas tenté d'attirer l'attention sur certaines données d'observation inhabituelles et même suspectes à l'occasion de leurs travaux, montrant parfois des discontinuités imprévues dans l'histoire de la nature.

L'importance des glaciations

Parmi ces chercheurs en marge, le naturaliste suisse Louis Agassiz (1807-1873), catalogué souvent comme "catastrophiste et fixiste attardé", mit le premier en évidence l'importance des glaciations (1) qui se sont succédé au cours de l'ère quaternaire, notamment la dernière, obligatoirement récente, qui a laissé en de nombreux endroits des traces indélébiles. Il en fit la cause principale du catastrophisme qu'il défendait contre vents et marées.

Beaucoup plus tard, les scientifiques comprirent que la déglaciation qui avait suivi avait eu des répercussions extraordinaires, à la fois pour la Terre (2), mais aussi et surtout pour l'humanité, en l'obligeant à abandonner les rivages océaniques qu'elle occupait d'une manière préférentielle, pour refluer vers l'intérieur des terres, au fur et à mesure que le niveau des eaux montait, parfois au rythme d'un quart de mètre par génération. Cette déglaciation fut de loin l'événement le plus important que la Terre ait subi depuis 20 000 ans, notamment au niveau de la géographie, sans cesse réactualisée durant cette période avec l'envahissement progressif des talus continentaux, même si d'autres cataclysmes, terrestres ou d'origine cosmique, eurent également des conséquences très importantes.

La découverte d'Eros

Une autre découverte essentielle de cette période intermédiaire fut celle d'Eros (3) le 13 août 1898 par Gustav Witt (1866-1946). Il faut savoir que durant tout le XIX^e siècle, plus de 400 astéroïdes furent découverts, d'abord visuellement par les chasseurs d'astéroïdes, et photographiquement ensuite à partir de 1891 (4). Tous circulaient entre Mars et Jupiter avec des demi-

grands axes s'étalant entre 2,15 et 4,30 UA, avec des excentricités faibles ou moyennes, mais jamais fortes, ce qui excluait toute forte approche à Mars et à Jupiter et, a fortiori, aux autres planètes plus éloignées, parmi lesquelles en premier lieu, la Terre.

Or Eros, c'était tout autre chose, et cette découverte totalement inattendue fut donc une grosse surprise pour les astronomes de l'époque. Pour la première fois, on se trouvait en présence d'un astéroïde ayant une distance moyenne ($a = 1,458$ UA) plus faible que celle de Mars ($a = 1,524$ UA) et une distance périhélique ($q = 1,133$ UA) tout à fait imprévue et exceptionnelle. Les calculs montrèrent, en outre, qu'Eros pouvait s'approcher à 0,15 UA seulement de la Terre, soit 22 millions de km, ce qu'il avait fait en janvier 1894, quatre ans avant sa découverte.

L'existence de petits astéroïdes pouvant s'approcher fortement de la Terre était une chose impensable pour toutes les générations antérieures d'astronomes. Aucun n'en avait jamais fait état comme d'une possibilité sérieuse. Pour eux, seules quelques rarissimes comètes étaient en mesure de venir frôler notre planète. C'est ce qui explique en grande partie que l'impactisme terrestre n'ait jamais eu beaucoup de succès dans les milieux scientifiques au XIX^e siècle et avant puisque, d'après les astronomes eux-mêmes, il n'existait pas de corps célestes, hormis les comètes, capables de heurter les planètes. L'observation des innombrables cratères lunaires, à partir de 1610, aurait dû mettre pourtant la puce à l'oreille des observateurs, mais l'origine volcanique était privilégiée à l'époque.

Il faut se rappeler aussi que, jusqu'au début du XIX^e siècle, la communauté scientifique refusait d'admettre la réalité des chutes de météorites sur la Terre. Il fallut que la "pluie de pierres" de L'Aigle, le 26 avril 1803, ait des centaines de témoins oculaires pour que l'évidence soit enfin admise (5). On comprend mieux ainsi l'importance de la découverte d'un objet comme Eros, qui est un jalon aussi capital que l'approche de D/Lexell en 1770 dans l'histoire de l'impactisme terrestre.

Les comètes usées deviennent des astéroïdes

Autre découverte importante durant cette période de transition, celle d'Hidalgo en 1920 par Walter Baade (1893-1960). En effet, cet "objet" fut le premier astéroïde d'origine cométaire repéré sur une orbite extérieure en moyenne à celle de Jupiter ($a = 5,77$ UA), avec une très forte excentricité ($e = 0,66$) et aussi une très forte inclinaison ($i = 42,5^\circ$). Hidalgo est toujours apparu aux astronomes d'une manière ponctuelle, c'est-à-dire comme un astéroïde classique, et logiquement catalogué comme tel, mais ils n'ont jamais été dupes et ont compris rapidement qu'il s'agissait d'une ancienne comète dégazée débarrassée de tous ses éléments volatils, en fait d'une comète morte. Avec Hidalgo, il était donc prouvé que si toutes les comètes évoluent (ce qu'on savait déjà), certaines d'entre elles deviennent parfois des astéroïdes à la fin de leur vie active. Découverte fondamentale qui allait se confirmer souvent par la suite.

Les EGA, la preuve astronomique de l'impactisme

La découverte d'Eros ne pouvait rester isolée. Il fallut cependant attendre les années 1930 pour enregistrer une moisson de découvertes qui allait provoquer "le déclic" indispensable dans l'esprit de certains scientifiques et faire ainsi évoluer (très lentement) les mentalités.

En 1932, deux astéroïdes qui ont d'ailleurs donné leur nom aux deux premiers types de NEA furent découverts coup sur coup. Le 12 mars, Amor fut photographié à Uccle, en Belgique, par Eugène Delporte (1882-1955). Généralement considéré les premiers jours comme une comète ponctuelle, il passa à 0,108 UA de la Terre (16,2 MK) le 22 mars 1932, détrônant l'approche record d'Eros en 1894 (0,153 UA le 20 janvier). L'étude soigneuse des clichés indiqua clairement cependant que l'on se trouvait en présence d'un astéroïde et non d'une comète. C'est le même cas que celui qui s'était déjà produit en 1920 avec Hidalgo. Une comète, pour être cataloguée comme telle, doit être dans tous les cas un *astre actif*, ce qui n'était pas le cas d'Amor, ni aucun des NEA découverts par la suite, même si certains objets astéroïdaux sont incontestablement d'origine cométaire, ou même parfois des comètes provisoirement *en sommeil* et susceptibles de se "réveiller" dans l'avenir à la suite d'une petite collision avec un autre objet cosmique.

Quelques semaines plus tard, un nouveau NEA exceptionnel, baptisé par la suite Apollo, était photographié le 24 avril à Heidelberg par Karl Reinmuth (1892-1979), l'astronome allemand qui a découvert près de 400 astéroïdes à lui tout seul en un demi-siècle. Les calculs indiquèrent une approche à la Terre avec 0,075 UA (11,2 MK) le 15 mai 1932, inférieure à celle d'Amor. Pour la première fois, un astre autre qu'une comète s'approchait à moins de 0,100 UA de la Terre et pénétrait à l'intérieur de l'orbite terrestre, et même de celle de Vénus, grâce à des éléments orbitaux étonnants ($a = 1,47$ UA ; $e = 0,56$ et $q = 0,65$ UA). Apollo fut donc à la fois le premier EGA (avec $D_m < 0,100$ UA), le premier des Earth-crossers (qu'on appelle en français les *géocroiseurs*) et le premier *Vénus-crosser*. Il donna son nom aux astéroïdes qui pénètrent à l'intérieur de l'orbite terrestre : le type Apollo.

L'impactisme planétaire prenait un nouveau départ avec cette constatation remarquable : Apollo frôle les orbites de trois planètes (celles de Vénus à 0,002 et 0,06 UA, de la Terre à 0,02 et 0,03 UA et de Mars à 0,05 UA). L'existence d'objets naturels pouvant heurter les diverses planètes était prouvée. L'origine des cratères lunaires et ceux (soupçonnés seulement à l'époque) des autres planètes et satellites s'éclairait enfin d'une manière simple et lumineuse.

En 1936, le record d'Apollo était largement battu par Adonis, un petit EGA découvert par Delporte. Ce nouveau venu frôla la Terre à 0,015 UA (2,2 MK) le 7 février 1936. Cette annonce par les astronomes fit sensation à l'époque, confirmant la probabilité d'impacts cosmiques sur les quatre planètes

intérieures, car Adonis peut également frôler trois planètes (Vénus à 0,01 et 0,02 UA, la Terre à 0,01 et 0,02 UA également et Mars à 0,01 et 0,04 UA).

L'année suivante allait être celle de la découverte de l'un des plus remarquables EGA connus à ce jour : Hermes, repéré le 28 octobre 1937 par Reinmuth. Cet objet passa à 0,005 UA (0,75 MK) de notre planète le 30 octobre. Il était si rapide dans le ciel (5° à l'heure à l'instant du rapprochement maximal) que les astronomes ne purent le suivre. Les calculs indiquèrent que son orbite s'approche en fait à 0,002 UA (330 000 km), soit à une distance inférieure à celle de la Lune. Hermes a également une seconde approche très serrée à son autre nœud (0,003 UA). Il s'agit donc d'un EGA très intéressant qui a été très longtemps perdu avant d'être retrouvé en 2003. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'un astéroïde double.

Ainsi, à la fin des années 1930, le paysage avait radicalement changé dans le domaine des astéroïdes. Loin de circuler tous dans l'anneau principal (2,07-3,58 UA), certains objets avaient des orbites nettement plus petites (et des périodes de révolution beaucoup plus courtes), et pouvaient avoir des approches serrées aux quatre planètes intérieures. Aujourd'hui banale, cette révélation était révolutionnaire. Pourtant, hormis les astronomes, la grande majorité des scientifiques des autres disciplines n'en saisirent pas la portée. Et la guerre mit une parenthèse de près de dix ans dans la recherche en général (excepté dans le domaine des armes et les domaines apparentés), et dans la recherche astronomique en particulier.

Les astrolèmes, la preuve terrestre de l'impactisme

La preuve terrestre de l'impactisme fut apportée au début des années 1950 par la découverte des premiers *astrolèmes*. Des reconnaissances aériennes permirent de repérer sur le territoire américain (États-Unis et Canada) des structures de taille kilométrique, et même décakilométrique, invisibles du sol. Des études complémentaires effectuées sur le terrain confirmèrent la réalité de ces structures d'origine cosmique, puisque formées à la suite d'impacts d'astéroïdes.

La mise au point de techniques multidisciplinaires de recherche, basées surtout sur le métamorphisme de choc, permit d'élargir l'éventail des découvertes qui purent se faire un peu partout, mais en nombre quand même assez restreint. Cela est dû au fait que les formations terrestres, contrairement à celles de la Lune, sont éphémères et sont littéralement "gommées" de la surface terrestre, principalement par l'érosion, mais aussi par les effets de la tectonique des plaques qui restructure continuellement la croûte terrestre (continents et fonds des océans).

En un demi-siècle, plusieurs centaines d'astrolèmes ont été recensés (actuellement classés en confirmés, probables, possibles et rejetés), dont 180 définitivement confirmés, mais la moisson est loin d'être close. Car, aujourd'hui, on est en mesure de découvrir des astrolèmes invisibles, même

s'ils sont relativement récents à l'échelle astronomique. Dans les années 1990, on a ainsi découvert le fameux astrolème de Chicxulub, d'un diamètre de 180 km et vieux de 65 MA, mais aussi celui de Chesapeake Bay, d'un diamètre de 90 km et vieux de 35 MA. Tous deux sont en corrélation certaine avec la fin de deux périodes géologiques particulièrement importantes, respectivement la fin du Crétacé et la fin de l'Éocène.

Certains astrolèmes géants, repérés par les astronautes lors de diverses missions autour de la Terre, mais aussi par des satellites spécialisés dans l'observation de notre planète depuis les années 1960, restent pour le moment incertains, mais il est sûr que le XXI^e siècle permettra d'en authentifier quelques-uns de plusieurs centaines de km de diamètre.

Découverte de l'impactisme invisible

La découverte de la radioastronomie remonte à 1931, avec la révélation extraordinaire de l'existence d'ondes venant de l'espace, mais elle ne fut vraiment opérationnelle qu'à partir du début des années 1950, avec le grand redémarrage de la recherche scientifique et surtout avec la mise en place d'instruments géants (les fameux radiotélescopes), capables de scruter l'espace avec une précision inconnue auparavant.

A partir de cette époque, ce fut une cascade de découvertes, mais surtout la mise en évidence fondamentale que l'Univers est violent. Tout est violence dans l'Univers, à n'importe quelle échelle de temps ou de lieu, et les radioastronomes eurent vite fait de comprendre, comme je l'ai dit dans l'introduction : le cataclysme est la règle dans l'Univers, partout, toujours. Cette réalité, fondamentale car elle conditionne à la fois notre passé et notre avenir, doit être martelée afin d'être progressivement acceptée par le public cultivé comme une vérité incontournable. On sait que celui-ci ignore souvent les données essentielles de l'Univers dans lequel il vit, dans lequel il est partie prenante au même titre que tous les autres objets qui le compose, qu'il est poussières d'étoiles.

Une révolution scientifique : l'iridium et les dinosaures

L'histoire de l'iridium et des dinosaures est parfaitement connue du public, car elle a bénéficié d'une médiatisation sans précédent durant les années 1980. Elle est exemplaire dans la mesure où elle a bénéficié d'une recherche multidisciplinaire unique, sujette à de très nombreuses controverses, vu l'importance des conséquences scientifiques, mais aussi épistémologiques qui étaient en jeu, ce qui a permis d'obtenir des preuves irréfutables et donc définitives de l'impactisme et du catastrophisme dans toutes les sciences concernées. On a compris aussi que plusieurs sciences étaient concernées.

Je consacre un chapitre spécial (le chapitre 12), dans la partie " *Preuves* ", à la mort des dinosaures et à celle d'une multitude d'autres espèces qui n'ont

pas franchi la fameuse frontière géologique Crétacé-Tertiaire (notée K/T). Le responsable est connu : un corps céleste (astéroïde ou comète) d'un diamètre de 10 km environ, la preuve l'est aussi : l'astroblème de Chicxulub au Mexique. Aujourd'hui la cause astronomique de la fin de l'ère secondaire n'est plus seulement une hypothèse plausible, comme elle l'était déjà durant les années 1970, mais bien une démonstration de la réalité de l'impactisme terrestre, avec les conséquences biologiques qui en découlent.

Les météorites de l'armée américaine et l'ennemi extérieur

En 1993, les militaires américains créèrent une vive surprise en annonçant à la presse que la Terre était continuellement heurtée par des corps célestes d'une dizaine de mètres qui explosent dans l'atmosphère sans laisser de traces (6).

Pour bien comprendre la raison et l'importance de ces révélations, impensables dix ans plus tôt, il faut savoir que toutes les observations militaires étaient "top secret" et ne sortaient donc jamais des bureaux d'études de l'armée. Cette manie du secret, dada des militaires de tous les pays, fut levée avec la fin de la guerre froide, et surtout à la suite d'un changement radical de la stratégie des militaires américains, à la recherche d'un nouvel ennemi crédible pour justifier le budget colossal et très disproportionné avec la menace réelle que constituaient leurs divers ennemis potentiels au début des années 1990.

Les militaires américains trouvèrent rapidement le nouvel ennemi providentiel sous la forme de " l'ennemi extérieur ". La découverte de très nombreux astéroïdes pouvant frôler la Terre à partir de 1989 fut une véritable révélation pour les stratèges militaires américains qui devinrent très rapidement (pragmatisme oblige !) le sponsor n° 1 de la recherche de tels objets, non sans arrière-pensées, on s'en doute. C'est ainsi qu'ils lancèrent, en partenariat avec la NASA, caution scientifique, le fameux programme NEAT en 1994, destiné à compléter, ou plus exactement à concurrencer, le programme purement scientifique du même type mené depuis 1989 à Kitt Peak avec le télescope automatique Spacewatch, par l'équipe de Tom Gehrels (1925-2011). Et en 1996, c'est l'US Air Force qui lança son programme de recherche LINEAR, à Socorro au Nouveau-Mexique, qui a connu depuis un succès incroyable par son ampleur (plus de 1500 NEA découverts à lui tout seul en dix ans).

C'est donc dans ce contexte de " restructuration idéologique " que l'annonce de la menace céleste fut faite à une presse incrédule. Quelles furent les révélations de l'armée américaine ? En gros, celles-ci : entre 1975 et 1992, ses satellites d'observation (satellites espions pour parler clair) avaient enregistré pas moins de 136 explosions de grosses météorites dans la haute atmosphère terrestre, libérant chacune une énergie comparable à celle des bombes atomiques terrestres. C'était une révélation dans la mesure où les astronomes eux-mêmes n'avaient jamais enregistré ces soi-disant

explosions. On voit comment une simple retombée de l'espionnage militaire montrait l'incapacité des scientifiques à enregistrer une multitude d'impacts, dont certains à moyen terme pourraient s'avérer dangereux pour la Terre elle-même.

Par cette annonce spectaculaire et savamment programmée, puisque destinée à se donner un petit vernis scientifique, l'armée américaine se présentait comme un partenaire obligé, incontournable. Partenaire qui a rapidement délimité son propre champ d'action : la destruction de tous les objets menaçants venant de l'espace, avec le corollaire à peine caché : la fabrication des armes (nucléaires) capables de les éliminer ou de les détourner sur une orbite sans danger. C'est ainsi que l'armée américaine s'est auto-proclamée comme le défenseur universel de la planète. Et le pire, c'est que l'on sera bien content de la trouver un jour, dans un avenir peut-être pas très lointain, pour faire ce travail de destruction devenu indispensable.

Les scientifiques ont repris les données des militaires pour les analyser. En fait, il s'avère que la grande majorité de ces impacts atmosphériques passent complètement inaperçus du sol. Un tel impact ne dure que quelques secondes, et il a lieu souvent au-dessus d'un océan ou d'un lieu désert. Les relevés des militaires ont permis de faire des statistiques précises. Chaque année, donc, furent enregistrées en moyenne huit météorites dont la puissance était supérieure à 500 tonnes de TNT, pouvant aller jusqu'à 15 000 tonnes (30 fois plus). Ces statistiques concernent les impacts atmosphériques observés, car les militaires l'ont avoué (étonnamment), la cadence du balayage des satellites était telle, qu'en fait, compte tenu de la brièveté du phénomène, seulement un impact terrestre sur dix a été enregistré. Et en prime on a su que sur les 136 explosions enregistrées dans le domaine infrarouge, seules trois ont pu être enregistrées par le capteur en lumière visible.

Parmi les 136 explosions recensées entre 1975 et 1992, trois ont été particulièrement importantes. Une le 15 avril 1988 au-dessus de l'Indonésie (la seule des 136 qui ait été observée sous la forme d'un bolide aussi brillant que le Soleil pendant une seconde), une autre le 1^{er} octobre 1990 dans l'ouest du Pacifique, et enfin une troisième le 4 octobre 1991 dans l'Atlantique nord. Ces trois explosions concernaient des objets d'une dizaine de mètres de diamètre moyen. L'armée américaine a aussi révélé qu'un astéroïde d'une vingtaine de mètres aurait explosé dans la haute atmosphère le 3 août 1963 entre l'Afrique du Sud et l'Antarctique, mais cette information était, elle aussi, restée secrète jusqu'à ce qu'elle soit, comme toutes les autres, "déclassée".

L'armée américaine s'est auto-proclamée, je l'ai dit, responsable de la sécurité terrestre. On devine aisément la suite. Les Chinois et les Russes, avec un minimum de retard quand même, se sont trouvés très intéressés par " l'ennemi extérieur ". Les Chinois ont mis en route un programme de détection d'astéroïdes proches et de comètes à Xinglong (resté en panne et

au résultat très décevant), et ont préparé eux aussi le matériel (militaire) pour détruire un éventuel objet menaçant. Les Russes n'ont pas voulu être en reste et ont recyclé leurs armes pour les pointer éventuellement vers le ciel. L'ennemi extérieur aura été pour tous les militaires des grands pays une véritable aubaine...

En résumé, cet épisode des "météorites américaines" aura été fort utile quand même pour prouver définitivement que, quasiment chaque semaine, un objet cosmique de dix mètres de diamètre rentre dans l'atmosphère terrestre, fréquence totalement insoupçonnée avant l'existence de satellites espions spécialisés.

L'impactisme microscopique est permanent, quotidien. En principe, il n'a aucune conséquence. En principe seulement, car, comme nous le verrons au chapitre 16, certains astronomes croient que la poussière cosmique pourrait être un vecteur privilégié de la *panspermie microbienne*.

SL9 : la preuve en direct de l'impactisme planétaire

A peine éteinte, la longue polémique concernant l'extinction massive de la fin de l'ère secondaire, qui fut le premier grand problème scientifique traité d'une manière résolument multidisciplinaire, les astronomes ont eu une chance unique : l'observation en direct de l'impact d'une comète (ou plus exactement de ses fragments), la célèbre *P/Shoemaker-Levy 9*, SL9 en abrégé, sur Jupiter en juillet 1994 (7). Ce sujet important est traité au chapitre suivant consacré à l'universalité de l'impactisme, mais il faut en dire quelques mots dans ce chapitre, car cet événement eut une importance considérable pour l'évolution des idées et aussi pour la "promotion" de l'impactisme, aussi bien chez les scientifiques que dans le grand public.

Je propose donc au lecteur quelques extraits d'un article sur le sujet (8), écrit trois mois avant l'impact, qui résume bien ce danger potentiel, fréquent à l'échelle astronomique.

" L'IMPACTISME PLANÉTAIRE : LA PREUVE EN DIRECT AVEC SL9

L'impact de la vingtaine de fragments de la comète *P/Shoemaker-Levy 9* (en abrégé SL9) sur Jupiter entre le 16 et le 22 juillet 1994 est un événement exceptionnel et d'une importance considérable. C'est la preuve *en direct* de la réalité *actuelle* de l'impactisme planétaire. Cet impactisme si longtemps contesté et décrié, mais qui conditionne, qui a *toujours conditionné* depuis plus de 4 milliards d'années, l'évolution des planètes du Système solaire, et en particulier celle de la Terre, avec les incidences (les conséquences souvent) biologiques que cela implique dans certains cas.

Cette collision des fragments de SL9 dépasse de surcroît tout scénario crédible qu'un auteur de science-fiction actuel aurait pu imaginer : 20 mini-comètes au minimum, avec des diamètres s'échelonnant entre quelques centaines de mètres et 4 km pour le fragment majeur, vont heurter une seule planète en une semaine...

SL9 est en orbite autour de Jupiter depuis sa capture (en non plus en orbite autour du Soleil) et sa vitesse d'impact est très importante (60 km/s), le triple de celle que l'on retient en général comme moyenne pour les impacts terrestres. On sait qu'une vitesse triple entraîne une énergie cinétique multipliée par 9. L'énergie totale libérée par cette vingtaine d'impacts sera très importante à l'échelle terrestre, mais relativement modeste à l'échelle de Jupiter. Comme la planète géante n'a pas de surface solide *accessible*, seuls des effets atmosphériques seront enregistrés et ils ne seront que de courte durée (quelques semaines sans doute).

On ignore la densité exacte des fragments de SL9, mais les chiffres actuellement retenus (de 0,3 à 0,5 g/cm³) pourraient être en deçà de la réalité. Si l'on retient pour le fragment majeur les valeurs suivantes : diamètre = 4,0 km, densité = 0,5 et vitesse d'impact = 60 km/s, on obtient une énergie cinétique de 3,02²² joules, soit environ 7 millions de mégatonnes de TNT. Pour la dizaine de fragments de l'ordre de 1,0 km de diamètre moyen, on obtient pour chacun une énergie cinétique de 4,71²⁰ joules, soit 110 000 MT de TNT. Pour les petits fragments de 500 mètres, l'énergie tombe à 5,89¹⁹ joules (14 000 MT) l'unité.

Tous ces chiffres parlent d'eux-mêmes : un tel impact multiple sur la Terre eût entraîné la fin de notre monde, ou tout au moins celle de notre civilisation. Car il ne faut pas se le cacher : un tel bombardement cosmique sur la Terre, à l'époque actuelle, serait imparable. Un seul objet menaçant détecté à l'avance, même volumineux (comme SL9 *avant* sa fragmentation) pourrait probablement être détruit ou dévié, mais 20 fragments arrivant en même temps (comme ceux de SL9 *après* sa fragmentation) n'auraient jamais pu être interceptés dans leur totalité.

La collision de SL9 sur Jupiter est une chance unique pour les astronomes qui vont l'étudier en grand détail. Sur Terre, c'eût été l'Apocalypse ! On comprendra mieux après coup l'intérêt extrême de cet événement inattendu pour la compréhension de notre vraie place dans l'univers cataclysmique dans lequel nous vivons : une place tout à fait insignifiante et provisoire, qui peut être remise en question sur un coup unique du destin (pas par la volonté d'une divinité quelle qu'elle soit !). Cet impact en direct éclaire ce qui s'est passé maintes et maintes fois au fil du

temps astronomique sur chacune des planètes. Il explique (s'il en était encore besoin) de façon lumineuse les morts en masse quasiment instantanées que des générations de catastrophistes terrestres ont mis progressivement en évidence et cela malgré un environnement intellectuel souvent hostile. Quelle leçon ! "

La première bible : ***Hazards due to comets and asteroids***

Dans les années 1980, il est enfin apparu à la communauté scientifique au sens large que le danger potentiel présenté par les astéroïdes et les comètes avait été terriblement sous-estimé, et qu'une approche plus pragmatique du sujet était indispensable. Au cours des années 1990, plusieurs rencontres internationales multidisciplinaires permirent de confronter les divers points de vue et de mettre au point les diverses mesures envisageables devant la menace d'un NEO devenu vraiment menaçant.

En conclusion des quatre premières de ces rencontres très constructives et enrichissantes pour les participants, qui étaient très loin d'être tous des catastrophistes convaincus, est parue en 1994 la première synthèse scientifique, *Hazards due to comets and asteroids* (9), un livre de plus de 1300 pages, considéré comme la première "bible" sur le sujet, auquel ont participé 120 auteurs. La lecture de ce livre, qui traite tous les sujets concernés, fait comprendre les fantastiques progrès enregistrés en une seule génération, et le fait que les scientifiques aient dû abandonner une partie de leurs prérogatives aux militaires.

Certains chercheurs le regrettent, mais en fait c'est un problème de sagesse, obligatoire si l'on se place au niveau politique. Car le danger existe, et peut-être dès les prochaines décennies, on sera bien content que les militaires américains ou/et (et, car l'urgence l'exigera peut-être) russes et chinois, d'autres encore probablement dans l'avenir, soient en mesure d'intervenir pour éviter une catastrophe, sinon planétaire, du moins locale, qui pourrait exterminer des milliers, sinon des millions de personnes. Prévoir et être en mesure d'agir, la quasi-totalité des spécialistes savent bien qu'il est indispensable de dépasser aujourd'hui le domaine strictement scientifique pour privilégier la survie de l'espèce humaine. Je parlerai au chapitre 20 des diverses techniques envisagées pour faire face à un cataclysme d'origine cosmique potentiel.

L'école britannique néo-catastrophiste

Cette "école" de scientifiques britanniques (connue sous le nom de *British Neo-Catastrophist School*), regroupe surtout des astronomes partisans de la théorie du "catastrophisme cohérent" (10), c'est-à-dire qui veut prendre en compte *tous* les phénomènes se rattachant au catastrophisme, en particulier les événements historiques laissés totalement de côté par les scientifiques

qui ignorent tout (ou qui veulent tout ignorer, ce qui revient au même) des mythes et de l'histoire ancienne.

L'approche nouvelle et pragmatique des chercheurs britanniques constitue un progrès énorme pour la recherche de la vérité, même si celle-ci est dure à mettre en évidence. Je rappelle la phrase prophétique de Sénèque déjà citée dans l'introduction : " *Ne nous étonnons d'ailleurs pas que l'on amène si lentement à la lumière ce qui est caché si profondément* ". Sous l'impulsion de Victor Clube et Bill Napier, qui ont publié deux livres essentiels sur le sujet : *The cosmic serpent* en 1982 (11) et *The cosmic winter* en 1990 (12), de nombreux éléments de recherche ont été mis en œuvre, notamment les causes astronomiques des événements qui ont eu lieu depuis 13 000 ans, et qui ont été perpétués, de génération en génération, sous forme de légendes un peu ésotériques dans les mythologies des peuples du monde entier. Des chercheurs plus jeunes, comme Duncan Steel (13), Mark Bailey, David Asher, et quelques autres de la nouvelle génération d'astronomes, fervents partisans du catastrophisme historique, réussiront peut-être à trouver des preuves irréfutables.

Cette approche pragmatique est évidemment combattue par les chercheurs traditionalistes (14), et par les mandarins de l'impactisme qui défendent leurs acquis, difficilement gagnés en vingt ans d'un travail réellement remarquable, et qui voient d'un mauvais œil des confrères plus modernes, qu'ils traitent d'ailleurs de pseudo-scientifiques, voulant aller encore plus loin, au risque de les "ringardiser" à court terme.

Surtout que certains des néo-catastrophistes, souvent des spécialistes des NEO (Near Earth Objects) et qui savent donc bien que l'ancienne échelle des fréquences d'impact est totalement obsolète (les météorites de l'armée américaine l'ont encore démontré), ne s'embarrassent pas de préjugés et sont prêts à réexaminer des tabous scientifiques, comme le site de Stonehenge et l'ancienneté du Sphinx. C'est pourtant en allant au maximum des possibilités d'investigation que sortira la vérité, même si certaines allégations un peu osées ne sont pas confirmées dans l'avenir.

Il faut donc saluer comme il se doit l'approche résolument moderne des chercheurs de l'école britannique. Ils essaient de faire sauter le dernier verrou psychologique qui entrave encore la connaissance de notre histoire cosmique. Dès que ce verrou psychologique aura sauté, et il sautera par la force des choses et probablement grâce à eux, les progrès devraient suivre très vite. Une collaboration multidisciplinaire, comme celle qui a conduit à la découverte du cratère de Chicxulub, permettra de renverser enfin tout un pan de pesanteurs archaïques et obscurantistes issues du milieu scientifique lui-même (ce milieu scientifique est beaucoup moins ouvert que l'on croit et il plie souvent sous le poids de contingences corporatistes), et débouchera sur une véritable révolution culturelle sans précédent sur le plan historique. Les cataclysmes d'origine cosmique éclairent l'histoire des hommes, comme je le montrerai au chapitre 19.

Un danger qui se précise

Je vais faire un point rapide des connaissances actuelles sur l'impactisme, réservant le détail des informations à connaître pour les trois parties " Causes ", " Preuves " et " Conséquences ".

Les Américains ont fait une étude quasi exhaustive du problème. Un résumé succinct est paru en 1994 dans un très intéressant petit livre : " *The threat of large Earth-orbit crossing asteroids* " (15), comme conclusion des travaux d'une commission d'enquête diligentée par le Congrès américain et destinée à cerner l'essentiel du danger causé par les astéroïdes et les comètes qui s'approchent près de la Terre (les fameux NEO) et les moyens à mettre en œuvre pour y remédier.

En dix ans, il y a eu un revirement spectaculaire des mentalités, à la fois sur un plan strictement scientifique (ce qui était la moindre des choses), mais aussi politique (et militaire) comme je l'ai expliqué plus haut.

L'utilité du réseau international Spaceguard

D'abord, la commission d'enquête a définitivement admis l'utilité du réseau *Spaceguard*, envisagé par les scientifiques dès le milieu des années 1980. Ce réseau a pris progressivement une forme plus élaborée, plus officielle, plus internationale, notamment sous l'impulsion de l'Union Astronomique Internationale (UAI) et du Congrès des États-Unis. Et en 1996, il a été mis en place, sur un plan international, une " *Fondation Spaceguard* " sous la responsabilité du spécialiste italien Andrea Carusi, dont la mission est de coordonner les recherches et les différents travaux concernant ce domaine devenu sensible.

L'Europe politique a suivi et l'Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe a publié une résolution n° 1080 du 20 mars 1996 sur le sujet (16). En voici quelques extraits :

" Étant donné que l'explosion à proximité de la Terre d'un objet ayant un diamètre d'à peine 60 mètres peut avoir l'effet d'une bombe nucléaire de 10 mégatonnes, toute collision avec un objet de taille supérieure aurait des conséquences catastrophiques à l'échelle de la planète... Le volume considérable d'informations qu'on a rassemblé ces dernières années sur les collisions d'astéroïdes et de comètes indique que celles-ci peuvent provoquer des catastrophes écologiques à grande échelle et à long terme, entraînant parfois la disparition totale d'espèces. Ces collisions constituent donc une grave menace pour nos civilisations... L'Assemblée incite les gouvernements des États membres, ceux qui bénéficient d'un statut d'observateur, et l'Agence spatiale européenne, à favoriser la mise en place et le développement de cette fondation de veille spatiale, et à apporter tout le soutien nécessaire à un programme international qui

permette : de dresser un inventaire des objets proches de la Terre aussi complet que possible... et de contribuer à l'élaboration d'une stratégie mondiale à long terme de réaction en cas de possibilité de collision. "

Ce revirement est vraiment significatif d'une prise de conscience d'un danger qui paraît plus proche depuis la multiplication des découvertes de petits NEA par les télescopes automatiques. Les programmes militaro/scientifiques américains ont clairement montré que le Système solaire est un véritable billard cosmique et que la Terre, comme les autres planètes et satellites, est à la merci d'une collision, même s'il ne s'agit que d'une pichenette à l'échelle terrestre.

La hiérarchie des impacts

Les impacts des astéroïdes et des comètes sur la Terre ont été divisés en quatre grandes catégories, selon le diamètre de l'objet et l'énergie dégagée (17). Il est bien évident qu'il n'y a pas grand-chose de commun entre un astéroïde de 10 mètres qui peut être efficient au niveau local et un autre de taille kilométrique qui peut avoir des conséquences au niveau mondial, notamment à travers les effets pervers d'un hiver d'impact, catastrophique pour les conditions mêmes de la vie sur Terre.

En 1998, l'astronome américain Richard Binzel a proposé une nouvelle classification des impacts (18), en trois parties, la première concernant cinq catégories d'impacteurs avec les dangers potentiels, la deuxième "l'indice de danger" avec six niveaux différents et la troisième " *l'Échelle de Turin* ". En juillet 1999, l'UAI a adopté officiellement cette nouvelle échelle sous l'appellation : *The Torino Impact Hazard Scale* (en abrégé *The Torino Scale* ou *l'Échelle de Turin*), principalement dans un but de communication vers les médias et le public, pour lequel on a ajouté de la couleur ! (5 zones de blanc à rouge et 11 nombres de 0 à 10). La zone rouge, c'est l'impact !

Le nombre d'objets existants : une inquiétante inflation

L'extraordinaire augmentation du nombre de NEA découverts depuis le début des années 1980, et surtout depuis le début des années 2000, a obligé les spécialistes à revoir sérieusement à la hausse leurs statistiques sur le nombre d'objets existants et donc à recenser. Même si chaque chercheur a sa propre méthode de calcul et ses propres chiffres, il n'empêche que des ordres de grandeur se dessinent.

Les chiffres sont impressionnants et les spécialistes (et leurs instruments) vont avoir du pain sur la planche. Les experts de la NASA tablent sur les chiffres suivants pour la population de géocroiseurs (c'est-à-dire uniquement les astéroïdes qui pénètrent à l'intérieur de l'orbite terrestre) : objets de 2 km = 400 ; de 1 km = 2100 ; de 500 m = 9200 ; de 100 m = 320 000 et de 10 m = 150 millions. Pour les comètes avec $q < 1,000$ UA, ils retiennent les chiffres suivants : objets > 1 km = 30 ± 10 ; de > 500 m = 125

± 30 et de $> 100 \text{ m} = 3000 \pm 400$. Les comètes actives ne représentent donc qu'une petite partie du total des NEO d'après les statistiques, mais il faut bien savoir que de nombreux NEA sont d'origine cométaire.

Le nombre d'objets minuscules est impressionnant : 150 millions auraient un diamètre de l'ordre de 10 mètres, ce qui est tout à fait considérable. Heureusement que, sauf exception, ils n'atteignent pas le sol. Ceux de 100 mètres restent extraordinairement nombreux : 320 000. En 1982, dans *La Terre bombardée*, je donnais le chiffre de 30 000 (10 fois moins) comme nombre total d'objets de plus de 100 mètres franchissant l'orbite terrestre.

Ce nombre de 320 000 paraît un peu exagéré, et certains se demandent s'il ne faut pas y voir la "patte" des militaires qui font le forcing pour imposer leurs vues (la mise au point d'armes spécialisées pour les détruire). Car un objet de 100 mètres qui doit heurter la Terre devra obligatoirement être détruit, sous peine de conséquences terrestres inimaginables, surtout si l'impact est océanique (19). C'est vrai que ces objets de 100 mètres sont extrêmement nombreux, mais le chiffre retenu par la NASA est à la limite de la provocation.

Les responsables du réseau *Spaceguard* se donnent un quart de siècle pour découvrir 95 % des objets de 100 mètres et plus, sachant qu'obligatoirement certains passeront à travers les mailles de leurs filets. Mais bien que les découvertes s'accélèrent, on est encore pour le moment très loin du compte. Dès le début des années 1990, les spécialistes tablaient sur 100 nouveaux NEA chaque année. Cet objectif optimiste n'a été dépassé qu'en 1998 grâce au programme LINEAR, mais depuis 2004 ce sont plus de 500 objets nouveaux par an qui ont été découverts par les stations spécialisées. Celles-ci, au nombre d'une petite dizaine, sont presque toutes américaines (parmi lesquelles celle du Mont Lemmon, en Arizona, particulièrement efficace), une seule européenne (La Sagra, en Espagne), les Européens s'abritant sans trop de complexes derrière le "bouclier" américain !

Une chose est sûre : la liste des objets connus va devoir être mise à jour en permanence (on en découvre plus de deux par jour en moyenne depuis 2008). Mais il faut bien savoir que le bilan ne sera jamais définitif, d'autant plus qu'il faut tabler sur un renouvellement constant comme je l'expliquerai aux chapitres 6 et 7.

La menace du ciel : une réalité pour demain

Dans les années 1990, un peu à la surprise des spécialistes qui travaillaient dans l'ombre pour faire connaître leur travail et le danger potentiel des NEO, la menace du ciel est quasiment devenue un fait de société, parfaitement assimilé dans les civilisations évoluées comme les nôtres. " *Le cataclysm est possible, probable à long terme puisque les scientifiques l'affirment, mais cela ne nous concerne pas vraiment à l'échelle humaine. Le drame est à venir pour les générations futures qui aviseront en temps utile* ". Tel est le credo que l'on entend généralement.

Des dizaines de livres et d'articles sont parus pour vulgariser le domaine de l'impact cosmique et ses conséquences. Celles-ci sont presque toujours sous-estimées, notamment les conséquences humaines et économiques. Seuls quelques chercheurs ont envisagé un impact d'envergure dans un pays surpeuplé, dans lequel la nourriture post-impact ferait défaut pour assurer le minimum vital aux nombreux survivants. Famine, épidémies, guerre civile, tout cela paraît si irréel, si peu probable à l'échelle humaine...

Le cataclysme cosmique est juste bon pour "frissonner" au cinéma. J'ai signalé dans l'introduction la sortie sur les écrans en 1998 de deux films sur le sujet de l'impact : *Deep impact* et *Armageddon* (20), qui ont pris la relève de *Meteor*, vieux déjà de presque vingt ans. Ainsi les jeunes ont pu, à leur tour, assimiler l'essentiel : l'existence de comètes et d'astéroïdes menaçants pour la Terre. Ils ont appris que l'homme est capable de venir à bout du danger, de survivre à un désastre terrestre de grande ampleur, et que de toute manière il survivra s'il y a impact. Conclusion : la menace du ciel ne fait pas vraiment peur aux Terriens des années 2010. Seul un impact annoncé pourrait créer une panique dont on n'a même pas idée.

Le cataclysme, force de destruction et force de création

Comme conclusion de cette première partie consacrée à l'évolution des idées sur l'impactisme et le catastrophisme, il est nécessaire de revenir sur la découverte peut-être la plus difficile à faire admettre, sinon à la communauté scientifique, tout au moins à l'homme de la rue qui ignore tout de l'astronomie, de la géologie et de la paléontologie : le cataclysme est une force de création.

Tout le monde admet sans trop de difficulté que le cataclysme est une force de destruction. Chaque année, sur la Terre, des cataclysmes comme des éruptions volcaniques, des tremblements de terre, des cyclones, des inondations dévastatrices et bon nombre d'autres catastrophes sont responsables de nombreuses pertes humaines et causent la ruine de milliers de personnes.

Faire admettre, par contre, que le cataclysme est aussi *une force de création* (21) est une tout autre histoire, et il a fallu attendre les années 1970 pour que ce concept révolutionnaire soit envisagé. A l'échelle humaine, c'est-à-dire à celle du siècle, il est incontestable que la force de destruction dépasse nettement la force de création.

Mais il faut un peu élargir le débat et se rendre compte que l'échelle humaine n'est que le temps d'un éclair si l'on se place déjà à celle du Système solaire et de ses 4,6 milliards d'années. L'évolution biologique a pu trouver à cette nouvelle échelle un espace de temps suffisant pour démarrer, s'installer, grandir, prospérer malgré de nombreuses périodes de récession. Cette évolution a bénéficié de cataclysmes cosmiques très nombreux, qui en libérant des niches écologiques précédemment occupées par des espèces

conquérantes, et peu disposées à partager le territoire disponible avec des espèces nouvelles, ont permis une explosion de la vie toujours orientée vers une complexité accrue. Les scientifiques savent bien que le passé explique le présent. Il faut donc prévoir le pire, car le pire est à venir.

Dès le prochain chapitre, nous verrons comment, à partir d'une matière inerte, le cataclysme, sous des formes diverses, a permis à l'Univers de prendre forme, d'évoluer et de se diversifier tout en s'enrichissant. Bien entendu, la vie a dû apparaître presque partout dans l'Univers, et celle que nous connaissons n'est probablement qu'une vie parmi beaucoup d'autres. Les scientifiques de la fin du XXI^e siècle en sauront beaucoup plus que nous à ce sujet. Et c'est tant mieux. Les connaissances acquises par l'homme durant un XX^e siècle révolutionnaire sur le plan scientifique doivent lui faire comprendre qu'une grande modestie est de rigueur.

Notes

1. W. Chorlton et autres, *Les périodes glaciaires* (Time-Life, 1984). Titre original : *Ice Ages* (1983).
2. A. Capart et D. Capart, *L'homme et les déluges* (Hayez, 1986).
3. La découverte officielle d'Eros a été attribuée, en toute logique, à l'astronome allemand Gustav Witt qui le photographia le *samedi* 13 août 1898 à l'observatoire Urania de Berlin, puisque c'est lui qui annonça le premier la découverte. Mais il faut savoir que Auguste Charlois, à Nice, l'avait lui aussi photographié le 13 août. Malheureusement pour lui, il remit au *mardi* 16 l'étude du cliché, parce que le 14 août était un dimanche et le lundi 15 un jour férié. Ainsi il fut devancé par Witt pour l'annonce de la découverte et perdit le bénéfice et le prestige associés à cette découverte très importante.
4. M.-A. Combes, *Historique des petites planètes*, Ciel et Terre, pp. 393-418, 1975. Un article qui raconte les différentes étapes d'une histoire sans fin.
5. Ce sujet a été traité au chapitre 3.
6. R. de la Taille, *Météorites, les Américains lèvent le secret*, Science et Vie, 919, pp. 44-49, 1994.
7. J. Spencer and J. Mitton (eds), *The great comet crash : the impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter* (Cambridge University Press, 1995). Pour (presque) tout savoir sur ce cataclysme unique.
8. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 9)*, Observations et Travaux, 38, 1994.
9. T. Gehrels (ed.), *Hazards due to comets and asteroids* (University of Arizona Press, 1994). Il s'agit d'un ouvrage collectif de 1300 pages auquel

120 auteurs ont participé. C'est le livre le plus complet jamais écrit sur le sujet. Mais depuis sa parution, les découvertes ont décuplé et certaines hypothèses et estimations sont à revoir.

10. J. Gribbin and M. Gribbin, *Fire on Earth : doomsday, dinosaurs, and humankind* (St Martin's Press, 1996).

11. V. Clube and B. Napier, *The cosmic serpent* (Faber & Faber, 1982). Malheureusement, ce livre important n'a pas été traduit en français et n'a pu toucher le grand public.

12. V. Clube and B. Napier, *The cosmic winter* (Blackwell, 1990). Ce livre est paru en français, en mars 2006, seize ans après la version originale, sous le titre *Hiver cosmique*, aux éditions Le Jardin des Livres. Il ne pouvait être question de l'actualiser. Ainsi donc, il est paru comme un livre "historique" dans la collection Référence.

13. D. Steel, *Rogue asteroids and doomsday comets* (Wiley, 1995). Un livre passionnant écrit par un des néo-catastrophistes britanniques les plus convaincus, spécialiste des NEA et du *Complexe des Taurides* de surcroît (voir les chapitres 6 et 7). Un spécialiste sans complexes, qui sait de quoi il parle et bien décidé à "faire le ménage".

14. D. Morrison, *Is the sky falling ?*, *Skeptical Inquirer*, pp. 22-28, may/june 1997. Article écrit par un grand spécialiste des astéroïdes, mais qui refuse d'aller aussi loin que les néo-catastrophistes.

15. NASA, *The threat of large Earth-orbit crossing asteroids* (U.S Government Printing Office, 1993). Ce remarquable livre édité par la NASA regroupe plusieurs documents parus séparément, notamment le rapport du Congrès américain sur le sujet (mars 1993), celui concernant " *The Near-Earth Object interception workshop* " (août 1992) et le " *Spaceguard survey* " (janvier 1992). Un document à lire pour comprendre que le problème des NEO est enfin pris au sérieux par les autorités américaines.

16. A.-C. Levasseur-Regourd et Ph. de La Cotardière, *Les comètes et les astéroïdes* (Seuil, S117, 1997). Citation p. 180.

17. D. Morrison (ed.), *Spaceguard survey : Report of the NASA international Near-Earth Object detection workshop* (NASA, 1992). C'est le premier document de référence sur le sujet édité par la NASA, incontournable pour tous les spécialistes, qui définit de nouveaux concepts et donne les chiffres à connaître.

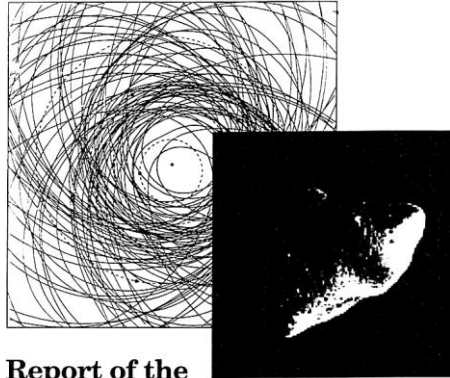
18. G.L. Verschuur, *Impact hazards : truth and consequences*, *Sky and Telescope*, 95, 6, pp. 26-34, june 1998.

19. G.L. Verschuur, *Impact. The threat of comets and asteroids* (Oxford Press, 1996).

20. *Deep impact* concerne l'impact d'une comète sur la Terre et *Armageddon* celui d'un énorme astéroïde.

21. F. Warshofsky, *Doomsday. The science of catastrophe* (Abacus, 1979).

The Spaceguard Survey



Report of the
**NASA International
Near-Earth-Object
Detection Workshop**

David Morrison, Chair

January 25, 1992

Figure 4. **The Spaceguard Survey**

Avec la publication de ce rapport de la NASA en 1992, la recherche des astéroïdes proches de la Terre (les NEA) et surtout ceux dangereux (les PHA) est devenue une priorité pour les scientifiques américains. Plusieurs surveys spécialisés ont vu le jour et le nombre de découvertes a explosé.

CHAPITRE 5

UN UNIVERS CATAclySMIQUE, PARTOUT, TOUJOURS

Une naissance cataclysmique : le Big Bang

Aujourd'hui, même si certains astrophysiciens restent d'un avis contraire, le problème semble résolu : notre Univers actuel a eu une naissance cataclysmique. C'est la fameuse explosion initiale : le Big Bang, que l'on se représente d'une manière un peu simpliste comme un gigantesque éclair lumineux, accompagné de conditions extrêmes de température et de densité. Son âge, par contre, est encore solidement débattu, même si l'on donne comme le plus probable l'âge de 15 milliards d'années.

L'image d'Epinal du point unique qui explose semble obsolète aujourd'hui et les astrophysiciens modernes, relativement d'accord sur ce point important, croient plutôt que l'Univers était déjà infini en étendue. Relisons Hubert Reeves (1), l'un des maîtres en la matière :

" Aux premiers moments de l'univers, il n'y a ni galaxies, ni étoiles, ni planètes, ni molécules, ni atomes, ni nucléons. La matière se présente alors comme une grande purée, uniforme, sans grumeau, sans condensation, sans structure d'aucune sorte. Cette purée est faite de particules élémentaires. On y rencontre des photons (les grains de lumière), des électrons (ceux du courant électrique) et des quarks.

Le premier chapitre de l'organisation de la matière se passe là, un millionième de seconde après le début. Les quarks, trois par trois, se combinent pour donner naissance aux nucléons. C'est le coup d'envoi de la matière qui se complexifie... "

Comme les astrophysiciens nous l'enseignent, le Big Bang c'est aussi le point de départ de la complexité, sans cesse réaffirmée au fil du temps, une complexité qui est loin d'être terminée et qui finira avec l'Univers lui-même, si toutefois il a une fin.

L'évolution cataclysmique de l'Univers

On sait depuis longtemps que l'espérance de vie des étoiles est d'autant plus brève qu'elles sont massives. Les plus massives, les supergéantes bleues, que l'on trouve en nombre dans les bras spiraux des galaxies, sont 100 000 fois plus brillantes que notre Soleil. Leur masse est de l'ordre de 20 à 50 fois celle de notre étoile. On a calculé que ces géantes bleues consomment leur carburant (l'hydrogène) en quelques millions d'années seulement, et qu'elles sont liées génétiquement avec la matière interstellaire qui les entoure et dont

elles sont issues. Une période de vie aussi courte montre bien que la matière interstellaire peut avoir servi de composant à plusieurs dizaines d'étoiles massives dans les régions de forte densité de matière cosmique.

Les différents scénarios de la mort des étoiles sont aujourd'hui bien compris et sont fonction de la masse initiale. Pour toutes, la fin est cataclysmique, mais sous deux formes différentes. Dans le cas d'une petite étoile, d'une masse inférieure à 1,4 masse solaire, quand elle a consommé tout l'hydrogène de son noyau transformé en hélium, ce noyau va subir une période de contraction liée à l'augmentation de la température, alors que les couches extérieures, au contraire, vont se gonfler et se refroidir. C'est la fameuse phase de la géante rouge, avec l'éjection de bouffées de matière qui réintègre le milieu interstellaire sous forme de poussière cosmique, mais sous une forme enrichie.

Hubert Reeves, dans son livre *Poussières d'étoiles* (2), ne peut être plus clair sur cette tranche de vie essentielle et constructive :

" La matière qui *retourne* à l'espace est différente de celle qui *vient* de l'espace. On y trouve les éléments chimiques que l'étoile a engendrés : carbone, oxygène, magnésium, etc. Ces atomes n'existaient pas avant la naissance de l'astre. Ils sont là maintenant, grâce à l'activité constructive des creusets stellaires. Chaque étoile contribue à enrichir le milieu interstellaire en éléments lourds. Au début de la Galaxie, ces éléments étaient absents. Graduellement, et par l'apport d'une multitude de générations d'étoiles, leur abondance a pu croître jusqu'à sa valeur présente. Plutôt que d'un cycle, il faudrait donc parler d'une *spirale*. Elle se déroule depuis plusieurs milliards d'années. Elle s'inscrit dans le cadre plus vaste de l'organisation de la matière... "

La mort des étoiles massives (plus de 1,4 masse solaire) est différente, plus violente. A la place de l'évacuation lente de matière par bouffées successives, c'est le cataclysme fulgurant de la supernova qui se produit. En quelques heures seulement, c'est-à-dire instantanément à l'échelle astronomique, l'étoile devient plus brillante que cent millions de soleils, et la température atteint plusieurs dizaines de milliards de degrés. Tous les éléments lourds sont fabriqués avant d'être éjectés et de rejoindre et d'enrichir le milieu interstellaire. Ils seront réutilisés plus ou moins rapidement par une génération ultérieure d'étoile. " *C'est le feu d'artifice de l'évolution nucléaire* " cher aux astrophysiciens. En même temps sont éjectés les rayons cosmiques qui, eux, traverseront l'Univers, heurtant continuellement la haute atmosphère terrestre.

Chaque année dans l'Univers visible se produisent quelques dizaines d'explosions de supernovae. Cela signifie qu'il s'agit d'un phénomène permanent dans l'espace et dans le temps, dans la mesure où souvent on

enregistre des explosions qui peuvent dater de millions ou même de milliards d'années.

Pour conclure, on peut donc affirmer qu'on trouve bien dans le phénomène d'évolution cataclysmique des étoiles la preuve que le cataclysme est une force de création puisqu'il est source d'évolution et de complexité.

La naissance du Système solaire

Les théories catastrophistes de la formation du Système solaire

Les astrophysiciens regroupent les différents modèles de formation du Système solaire en quatre classes (3) selon qu'ils répondent, ou non, à deux caractéristiques fondamentales :

1. Le Soleil et le cortège planétaire sont-ils *cogénétiques* (c'est-à-dire formés en même temps avec le même matériau originel) ?
2. Le matériau du cortège planétaire provient-il d'une matière *interstellaire inaltérée* ou d'une matière *stellaire altérée* ?

Avec cette double interrogation, c'est l'histoire même du Système solaire qui est en jeu. Selon que la réponse aux deux questions est oui ou non, on se trouve en présence de quatre grandes classes de théories que plusieurs générations d'astronomes, puis d'astrophysiciens, ont tenté d'affiner au fil du temps, obligés qu'ils étaient de tenir compte de données de plus en plus nombreuses et de plus en plus "pointues", et souvent discriminatoires pour les théories qui ne se pliaient pas aux observations. La plupart d'entre elles, bien sûr, sont définitivement abandonnées, puisque incapables de répondre favorablement à certains critères incontournables.

Sur les quatre classes de théories cosmologiques, deux concernent des théories *catastrophistes*, mais elles sont cependant totalement différentes. La première regroupe quatre théories prônant *une origine cogénétique* du Soleil et du cortège planétaire, avec pour celui-ci *une matière stellaire, altérée* suite à un chauffage à très forte température. C'est l'hypothèse classique du Soleil, *étoile double* à l'origine, et dont le compagnon se serait désintégré et dont la matière aurait partiellement servi à former les planètes.

La seconde classe regroupe douze théories prônant une origine différente (*non cogénétique*) avec une matière également *stellaire*. C'est la fameuse hypothèse de la *rencontre fortuite entre deux étoiles* qui s'est terminée par une *collision* (hypothèse de Buffon) ou plus sûrement par une quasi-collision. Dans cette version, entrent en jeu des effets de marée gigantesques qui éjectent les couches externes du Soleil primitif (et éventuellement celles de l'autre étoile), la matière éjectée se mettant en orbite autour du Soleil, et servant par la suite à former les planètes. Cette hypothèse de la rencontre a

eu plusieurs partisans célèbres, notamment James Jeans (1877-1946) qui contribua fortement à sa promotion dans le premier quart du XX^e siècle.

La formation du Système solaire n'a pas été catastrophiste

Jugées acceptables jusque dans les années 1960, les deux classes catastrophistes sont aujourd'hui quasiment éliminées pour la raison suivante. La détermination du rapport deutérium (hydrogène lourd) sur hydrogène D/H dans l'espace interstellaire et dans l'atmosphère de Jupiter s'est révélée essentiellement la même, alors que dans la photosphère du Soleil, ce rapport est beaucoup plus faible. Il s'agit là d'un résultat fondamental qui a des conséquences décisives.

Pour tous les astrophysiciens, le verdict est sans ambiguïté : la matière du cortège planétaire est typiquement interstellaire. Elle est restée *inaltérée*, alors que la matière composant la photosphère a été altérée très logiquement par des réactions nucléaires dans le Soleil, pour lesquelles des températures très importantes sont impératives. La classe 1, celle qui regroupe les théories qui considèrent que le Soleil et les planètes se sont formées *en même temps* à partir du *même nuage* interstellaire, apparaît aujourd'hui nettement comme la plus probable, même si les théories de la classe 2, qui postulent pour une capture du nuage interstellaire par le Soleil *après sa naissance*, gardent encore des partisans et restent crédibles. Saluons en passant Emmanuel Kant (1724-1804) et aussi Laplace qui furent les deux premiers à envisager cette solution qui s'avère la bonne. Laplace qui ne croyait pas à une formation catastrophiste du Système solaire (contrairement à Buffon), mais seulement à la réalité de catastrophes ultérieures. Deux siècles après, on se rend compte de son génie et de la puissance de son raisonnement.

Même si les deux classes de théories catastrophistes n'ont pas été responsables de la formation de *notre* Système solaire (Soleil + planètes), il est clair que ce double mécanisme a été efficace pour la formation d'*autres* systèmes analogues au nôtre, ailleurs, *partout* dans l'Univers, puisque les étoiles doubles, et plus généralement multiples, sont innombrables et que les rencontres serrées d'étoiles sont certaines et fréquentes à l'échelle astronomique.

L'histoire de la supernova présolaire

Le *cataclysme, force de création et de renouvellement de la matière*, ne perd jamais vraiment tous ses droits. Et si la formation du Système solaire n'a pas été catastrophiste en tant que telle, le matériau qui la compose a gardé les traces d'un fantastique cataclysme qui a précédé de peu cette formation : *l'explosion d'une supernova*. Pour prouver cette affirmation, il faut évidemment étudier du matériel cosmique contemporain de la formation du Système solaire. Celui-ci existe dans nos musées spécialisés : ce sont principalement les *chondrites carbonées*, mais aussi d'autres constituants comme certains *chondres* contenus dans certaines classes de chondrites.

Les météoriciens ont découvert, d'abord dans la fameuse météorite d'Allende, tombée sur Terre en 1969, et ensuite dans quelques autres météorites, que la composition isotopique du magnésium était anormale par rapport à celle de la Terre, de la Lune et des météorites classiques (4). La proportion de l'isotope 26 est supérieure à ce qu'elle devrait être. Ce surplus de magnésium 26 (^{26}Mg) s'explique par un apport d'aluminium 26 (^{26}Al), isotope radioactif qui se désintègre en se transformant en ^{26}Mg . Sans entrer dans le détail technique, il faut savoir que cet excès est dû à l'explosion d'une *supernova voisine* qui aurait injecté une partie de son matériau désintégré dans le Système solaire en formation. On sait que la période de ^{26}Al est de seulement 730 000 ans, et l'explosion et la formation des premiers grains solides du Système solaire ne peuvent être séparées que de deux à trois millions d'années au grand maximum.

On est sûr aujourd'hui que la naissance de notre Système solaire a été quasiment contemporaine de l'explosion cataclysmique d'une étoile voisine massive et qu'il a assimilé une partie des produits de sa désintégration, notamment des éléments lourds provenant d'une génération antérieure d'étoile. Seules certaines météorites gardent la trace indélébile de ce cataclysme gigantesque qui remonte à près de 4,57 milliards d'années. On se rend compte ainsi de la valeur inestimable d'une météorite comme celle d'Allende, appelée souvent la "pierre de Rosette du ciel".

Une formation agitée : la guerre des mondes

Depuis les années 1950, les spécialistes du Système solaire se sont penchés sur les différentes étapes qui ont conduit au système actuel, regroupé dans une "bulle" de matière de 1,5 année lumière de diamètre, avec comme frontières extérieures les limites du nuage cométaire de Oort.

Des centaines de simulations ont été effectuées, avec des conditions de départ très variées, aussi bien en ce qui concerne le nombre d'objets que la température dans le nuage présolaire. En fait, les conditions initiales ne sont pas connues avec précision et ne le seront jamais. Mais de ces simulations se sont dégagées quelques données incontournables, avec cette réalité : il n'y a plus que huit planètes (et non neuf, car Pluton n'est plus considéré comme une planète majeure aujourd'hui, mais comme l'un des membres principaux de la ceinture de Kuiper), mais aussi des millions de planètes secondaires, les KBO (Kuiper Belt Objects) dont le diamètre peut, pour les plus gros objets, dépasser les 1000 kilomètres.

Première étape : le billard cosmique

Deux maîtres mots s'imposent pour expliquer l'extraordinaire histoire du Système solaire : collision et accréation. La combinaison de ces deux phénomènes a été permanente et tout à fait déterminante à long terme. Les premiers millions d'années, la guerre des mondes a été impitoyable. C'est la période du *billard cosmique*, comme l'ont appelée les astronomes, qui a duré environ 500 MA. Certaines simulations (5) indiquent que pour

100 planétoïdes de $1,2 \times 10^{26}$ g chacun (6), utilisés pour la formation des seules planètes telluriques, il n'en existait déjà plus que 22 au bout de 30 MA circulant sur des orbites plus elliptiques, 11 après 79 MA, et seulement 6 après 150 MA.

La Terre se serait formée en 100 MA environ, à partir de la collision et de l'accrétion d'une multitude de planétoïdes plus petits. Car évidemment les 100 planétoïdes de départ des simulations ne sont qu'une hypothèse de travail et de calcul qui n'a rien à voir avec la réalité, quand une quasi-infinité de planétésimales de 1 km environ subsistaient, vestiges des premiers regroupements des grumeaux de poussières présolaires.

Les planètes rescapées ont vu leur surface littéralement criblées par des impacts quasi permanents et d'envergure très variée selon le diamètre et la vitesse de l'impacteur. Certains objets anciens, comme Callisto le satellite de Jupiter, ont gardé la marque indélébile de cette première étape, où l'impactisme planétaire était la clé de la *survie* ou de la *disparition*, selon le cas. Car certains impacts importants ont entraîné la désintégration de planètes de masse substantielle, déjà différenciées, mais victimes à leur tour de ces collisions destructrices.

On sait que la Lune est une planète recomposée, née d'une collision *rasante* entre deux corps célestes déjà différenciés (7) : la Terre initiale et une planète autonome de la taille de Mars (voir le chapitre 15 pour les détails). Ce cataclysme cosmique, de très grande envergure, n'a cependant été qu'un parmi beaucoup d'autres durant la phase "guerre des mondes", qui a permis de "faire le ménage" dans le Système solaire et de ne laisser que les planètes principales qui ont survécu jusqu'à nos jours.

On sait aussi que la formation de Mercure résulte d'un impact quasi central (et non pas rasant comme dans le cas du système Terre-Lune) entre deux proto-planètes respectivement de 0,14 et 0,02 masse terrestre. Cette collision a entraîné une augmentation importante du noyau métallique, et une diminution tout aussi importante du manteau de silicates. Les conséquences de ce cataclysme cosmique, lui aussi d'envergure, sont encore largement analysables aujourd'hui, notamment la forte densité de Mercure (5,44), incompréhensible si l'on exclut ce phénomène de fusion de deux noyaux métalliques préexistants à l'impact qui engendra, à partir de la matière de deux proto-planètes différenciées, une seule planète avec un très gros noyau métallique, et qui reprit, elle aussi, une forme sphérique.

Deuxième étape : l'impactisme planétaire

Si la première étape a duré moins de 500 MA, une deuxième étape a duré plus de 1000 MA, c'est celle de la cratérisation à outrance. Une multitude de fragments de quelques centaines de kilomètres de diamètre étaient encore dans le circuit infernal du billard cosmique, mais leur taille ne leur permettait déjà plus de menacer de destruction les grosses planètes qui avaient réussi leur accrétion. Ces fragments devaient se contenter du rôle

d'impacteur, avec comme résultat la formation de cratères d'impact. On en a encore des milliers d'aperçus sur toutes les planètes et satellites à surface solide, et notamment sur la Lune.

On connaît d'autres satellites planétaires qui ont été recomposés à la suite d'impacts (8), notamment Miranda, l'extraordinaire satellite n° V d'Uranus qui a un diamètre de 380 km. La sonde américaine *Voyager 2* l'a approché à seulement 30 000 km en 1986 et a pris des photos fantastiques de sa surface, d'une précision incroyable puisque certains détails ne dépassent pas 600 mètres. Son relief est apparu d'une complexité extrême, qui ne peut s'expliquer que s'il s'agit de l'assemblage d'une mosaïque de fragments brisés et "recollés", peut-être même à plusieurs reprises.

Troisième étape : l'impactisme résiduel

Une troisième étape, avec un Système solaire "nettoyé" des quelques planètes vagabondes ayant survécu jusque-là, mais pas des innombrables scories plus petites, a débuté il y a 3000 MA, avec un impactisme catastrophique diminué d'un facteur 100. C'est la phase résiduelle (tout est relatif, nous le verrons tout au long de ce livre) qui existe encore aujourd'hui.

Durant ces 3000 MA, les cataclysmes les plus importants furent le fait d'objets extérieurs, venus des deux réservoirs (déjà formés à l'époque) que constituent le nuage de Oort et la ceinture de Kuiper. Ces objets (parmi lesquels d'innombrables comètes actives), perturbés dans un premier temps, virent leur orbite devenir très excentrique, ce qui permit leur capture à l'occasion de leur "plongée" dans le Système solaire intérieur. Ce phénomène existe encore à l'échelle astronomique et durera aussi longtemps que le Système solaire lui-même.

L'impactisme lunaire et ses conséquences

Trois siècles et demi de cartographie lunaire

Quand Galilée pointa la première fois sa fameuse lunette vers la Lune, en 1610, il eut la surprise de voir, malgré la médiocrité des images, notre satellite truffé de mers et de cratères. Il dressa lui-même une première carte de la face visible, découvrant au passage les librations lunaires. Cette carte, malheureusement, ne nous est pas parvenue car elle fut brûlée (!) après sa mort. Ses successeurs au XVII^e siècle dressèrent une véritable cartographie de la Lune : Langrenus (1600-1675) en 1645, Hévélius (1611-1687) en 1647, Giovanni Riccioli (1598-1671) en 1651. C'est la nomenclature proposée par ce dernier qui passa à la postérité, faisant de la Lune "le cimetière des astronomes" et le "Panthéon des savants" (9).

C'est évidemment la photographie qui permit un nouvel essor significatif de la cartographie lunaire au XIX^e siècle, avec comme premier aboutissement le superbe atlas photographique de l'observatoire de Paris dressé entre 1896 et 1903, principalement par Maurice Loewy (1833-1907) et Pierre Puiseux

(1855-1928). Au XX^e siècle, on arriva progressivement à la connaissance parfaite de la topographie lunaire, avec surtout le progrès fantastique dû aux sondes spatiales lunaires qui permirent enfin, à partir de 1959, la découverte de la face cachée. L'aboutissement fut la cartographie exhaustive effectuée par la mini-sonde américaine *Clementine 1* (10) qui permit d'obtenir plus d'un million de clichés exceptionnels. La géographie lunaire n'a depuis plus de secret pour les astronomes.

Dès la mise en évidence, avec les premières lunettes, de cet étonnant relief tourmenté, les astronomes se posèrent la question de l'origine des diverses formations (11). Deux hypothèses concurrentes apparurent : l'hypothèse *météoritique* et l'hypothèse *volcanique*. Étonnamment, la première ne s'imposa jamais vraiment, et dans leur grande majorité des générations d'astronomes préférèrent la deuxième. Pour une raison simple, en fait, comme je l'ai déjà expliqué : avant la découverte d'Eros en 1898, personne ne croyait à l'existence de petits astéroïdes venant à proximité de la Terre et de la Lune, et on s'expliquait mal cette multitude de cratères lunaires, même si pour quelques-uns d'entre eux on pouvait admettre une *origine cométaire*.

C'est au XX^e siècle seulement que le problème fut définitivement tranché : la quasi-totalité des cratères lunaires est d'origine météoritique. Et les premiers clichés de Mars et de Mercure obtenus par des sondes spatiales ôtèrent le doute qui pouvait rester chez certains, Mercure notamment présentant une surface totalement constellée de cratères assez semblables à ceux de la Lune, et cela en dépit de sa proximité au Soleil. C'est bien la preuve que des petits corps ont circulé par millions partout dans le Système solaire.

Le problème de la cratérisation lunaire

Le nombre des cratères lunaires, depuis les plus grands (300 km de diamètre) jusqu'aux plus petits (quelques décimètres) est estimé à 40 ou 50 millions, mais il faut noter qu'une grande majorité sont des *cratères secondaires*, formés à la suite de la retombée d'innombrables débris éjectés lors de la formation des cratères primaires. Il n'empêche que le nombre d'impacts réels, différents, d'astéroïdes et de comètes sur la Lune se chiffre au bas mot en centaines de milliers.

L'étude détaillée de cette cratérisation (12) a été effectuée dans les années 1970 et a permis d'obtenir quantité de renseignements fort importants. D'abord celui-ci : la cratérisation météoritique a toujours existé dans le Système solaire, sur la Terre, sur la Lune et sur toutes les planètes. La fréquence de cratérisation qui était maximale entre 4,6 et 4,0 milliards d'années a ensuite rapidement diminué jusqu'à 3 milliards d'années, et depuis son niveau semble relativement constant.

Les mers lunaires (au nombre d'une vingtaine) sont de vastes étendues constituées principalement de roches basaltiques et qui ont été creusées par des impacts géants durant le premier milliard d'années de la Lune. Les

astronomes ont pu confirmer l'âge des cinq derniers grands bassins créés sur la Lune : mer du Nectar et mer des Humeurs, 4,2 milliards d'années, mer des Crises, 4,1 milliards d'années, mer des Pluies, 3,9 milliards d'années et mer Orientale, 3,8 milliards d'années. Il n'y a eu aucune mer créée après cette dernière date, seulement quelques grands cratères "tardifs". Ce n'est que dans un deuxième temps qu'elles furent envahies par les laves basaltiques issues des profondeurs de la Lune et générées par une activité interne (volcanique) qui fut intense, activité qui ne dura pas longtemps, contrairement à ce que les astronomes des générations précédentes croyaient dur comme fer.

Sur la Lune, il y a eu assez de cratères primaires entre 1 et 10 km de diamètre pour recouvrir la planète entière, ce qui montre bien l'extraordinaire intensité du bombardement cosmique. Il y a eu également assez de cratères de 100 à 1000 km pour la recouvrir. Une étude très détaillée des cratères lunaires par tailles a permis de trouver une loi de cratérisation qui peut se résumer ainsi : "Le nombre de cratères est en gros proportionnel au carré inverse de leur diamètre". Cela signifie que pour un nombre donné de cratères de 10 km de diamètre, un quart d'entre eux auront 20 km ou plus, un neuvième plus de 30 km et un seizième plus de 40 km. Tous les débris primaires et secondaires des impacts sont pulvérisés sur une profondeur variable qui peut atteindre plusieurs kilomètres pour les gros impacts. La couche de surface s'appelle la régolite.

De nombreux cratères lunaires ont plus de 200 km de diamètre, tous ont été formés par des astéroïdes de 10 km ou plus. Les quatre grands cratères lunaires récents de la face visible, facilement repérables, sont Copernic (93 km, 850 MA), Kepler (32 km, 790 MA), Aristarque (40 km, 150 MA) et Tycho (85 km, 96 MA). Tous les quatre sont associés à des traînées blanches ou rayonnements qui sont des formations superficielles, mais très caractéristiques et spectaculaires sous certains éclairages favorables. On pense qu'elles sont formées par une accumulation de matériaux lunaires très fins et d'albédo élevé et qu'elles sont appelées à "s'effacer" progressivement sous l'effet du rayonnement cosmique.

Conséquences terrestres

On ne doit jamais perdre de vue que les impacts lunaires ont eu leurs équivalents sur Terre, même s'ils n'existent plus aujourd'hui. Cependant, sur notre planète, le problème se pose différemment dans la mesure où l'atmosphère est un puissant protecteur, surtout pour les petits objets et ceux dont la cohésion est médiocre. Sur Terre, le risque de fragmentation et de désintégration est important, comme nous le verrons au chapitre 10.

L'étude détaillée de la cratérisation lunaire, mais aussi sur Mercure, a permis de dégager cette double évidence, qu'il est bon de rappeler :

– *la cratérisation météoritique a toujours existé*, mais ses effets ont été beaucoup plus violents durant les deux premiers milliards d'années du

Système solaire, à une époque où circulaient entre les grosses planètes actuelles, d'autres objets primaires (comme la proto-Lune par exemple) que l'on peut assimiler aux gros astéroïdes actuels comme Cérès, Pallas et Vesta dont le diamètre dépasse 500 km.

– *la cratérisation météoritique existe encore de nos jours*, à un rythme 100 fois inférieur à celui qui a prévalu durant les deux premiers milliards d'années du Système solaire. Elle concerne des astéroïdes secondaires qui continuent de se fragmenter. Cet émiettement permanent produit de petits objets, parmi lesquels les NEA planétaires, qui sont beaucoup trop insignifiants pour causer des cataclysmes à l'échelle du Système solaire, mais dont les diamètres correspondent parfaitement avec ceux des cratères observés à la surface de toutes les planètes, y compris les astéroïdes terrestres.

Les explosions de supernovae et d'hypernovae

L'explosion d'une supernova est un phénomène rare, puisqu'on en compte seulement trois par siècle en moyenne pour une galaxie ordinaire (13). Dans notre Galaxie, du fait de la position excentrée du Système solaire, seulement quatre ont été observées au cours du deuxième millénaire, celle de 1006 dans la constellation du Loup, celle de 1054 dans le Taureau qui a engendré la célèbre nébuleuse du Crabe, celle de 1572 dans Cassiopée observée par Tycho Brahe et enfin celle de 1604 dans la constellation Ophiuchus observée par Kepler et Galilée.

On sait qu'une supernova est le cataclysme le plus énergétique engendré dans l'Univers. C'est aussi la principale source du renouvellement perpétuel de la matière, puisqu'une grande partie de la masse de l'étoile est éjectée dans le milieu interstellaire, où elle servira de matériau pour une nouvelle génération d'étoile. Les astrophysiciens retiennent une valeur de l'ordre de 10^{45} joules pour l'énergie libérée par une supernova, valeur tellement énorme qu'elle n'a pas de réelle signification à notre échelle humaine, et une vitesse de plusieurs milliers de kilomètres par seconde pour la matière éjectée de l'étoile.

La supernova de 1987 dans le Grand Nuage de Magellan

Les astronomes, qui se lamentaient de ne pas avoir de supernova à étudier avant la fin du siècle, se sont rabattus volontiers sur la fameuse SN 1987A (14), supernova découverte photographiquement à l'observatoire de Las Campanas, dans les Andes chiliennes, la nuit du 23 au 24 février 1987, par l'astronome canadien Ian Shelton, dans le Grand Nuage de Magellan. Cette supernova, dont la lumière a voyagé pendant près de 170 000 ans, a été observée avec l'assiduité que l'on devine dans tous les observatoires placés convenablement.

Une étude minutieuse de toutes les étapes du cataclysme a permis d'affiner les modèles théoriques et de comprendre le mécanisme très complexe de l'explosion. On a pu identifier le progéniteur, l'étoile baptisée Sk-69202 (Sk

pour Sanduleak, du nom de l'astronome américain Nicolas Sanduleak (1933-1990), auteur d'un catalogue d'étoiles australes à la fin des années 1960), qui avait une masse comprise entre 15 et 20 fois la masse solaire et qui était membre d'un système stellaire triple. Sa luminosité était environ 100 000 fois supérieure à celle du Soleil et elle avait la particularité d'être une géante bleue et non une supergéante rouge.

Les débris éjectés par la supernova forment depuis l'explosion un nuage de gaz et de poussières en expansion très rapide qui rayonne dans tous les domaines (X, optique, radio et infrarouge). Cette supernova et toutes les autres, observées régulièrement dans les galaxies voisines, sont la preuve de l'existence permanente de grands cataclysmes cosmiques qui redistribuent la matière (enrichie d'éléments lourds) dans l'espace, mais aussi l'énergie (sous forme de rayons cosmiques).

Près de la Terre, une explosion équivalente aurait des conséquences sérieuses, surtout durant une période d'inversion géomagnétique, mais heureusement aucune n'est prévue pour les prochains millénaires. Parmi les étoiles connues, la plus susceptible de devenir une supernova dans notre Galaxie est la célèbre variable irrégulière *eta Carène* (η Carinae) qui est située à 9000 années lumière de nous. Elle a déjà subi une violente éruption entre 1836 et 1858, durant laquelle elle a éjecté l'équivalent d'une masse solaire, explosion spectaculaire qui a fait d'elle provisoirement la deuxième étoile la plus brillante du ciel après Sirius. On sait aujourd'hui que *eta Carène* est une étoile en fin de vie, dont la mort est proche (à l'échelle astronomique). L'explosion totale d'un tel monstre cosmique, d'environ 200 masses solaires, qui pourrait être une étoile double ou même multiple, sera fantastique. Même à 9000 années lumière, elle sera de loin l'objet le plus brillant du ciel (excepté le Soleil bien sûr), un phénomène réservé cependant à nos lointains descendants (quelques milliers d'années peut-être, pas moins).

L'hypernova de 1997 dans la Grande Ourse

Le 14 décembre 1997, un nouveau phénomène a été mis en évidence, encore plus violent qu'une supernova : l'hypernova de la Grande Ourse (15), liée semble-t-il à un sursaut gamma d'une violence inconnue jusqu'alors, lui-même associé à une explosion de deux astres compacts en rotation (trous noirs ou étoiles à neutrons). En deux secondes, la région incriminée a rayonné autant que le reste de l'Univers, soit une énergie comparable à plusieurs centaines de supernovae explosant en même temps. On a calculé une énergie de 3×10^{46} joules pour l'hypernova de la Grande Ourse, chiffre astronomique qui dépasse de très loin l'entendement humain.

Les conséquences de ces explosions stellaires sont encore mal appréciées dans le détail, mais celles-ci ont montré combien le *cataclysmisme* dans sa globalité était varié et complexe (16). Et surtout, comme on le savait déjà, il a toujours existé, puisque l'hypernova de la Grande Ourse *observée* en décembre 1997 est en fait un cataclysmisme cosmique qui remonte à près de

12 milliards d'années, c'est-à-dire en gros 3 milliards d'années après le Big Bang et 6,5 milliards d'années avant la formation du Système solaire. Déjà à l'époque de l'explosion, trous noirs et autres objets du même genre se rencontraient, explosaient, distribuant matière et énergie dans l'espace.

La leçon est incontournable. C'est celle que de nombreux chercheurs actuels préconisent sans relâche : *le cataclysme est la règle, partout, toujours. Il a toujours redistribué la matière, redistribué l'énergie, redistribué la vie aussi. Il est la clé de la vie terrestre, il est la clé de l'évolution. C'est la raison d'être de l'Univers.*

Le Soleil, étoile variable et colérique

Le Soleil est le maître absolu du Système solaire. Toute forme de vie est tributaire de lui. A première vue, il semble que la vie terrestre a pu s'installer et prospérer sans problème majeur depuis quelque 3,8 milliards d'années, c'est-à-dire tout de suite après la période de bombardement cataclysmique qui était un agent de destruction permanent. Même si quelques comètes étaient en mesure de déposer à la surface des planètes quelques germes biologiques qui ne demandaient qu'à se développer, ceux-ci étaient rapidement détruits par des impacts ultérieurs.

Qu'en est-il aujourd'hui du Soleil ? Apparemment son activité permanente reste dans des limites étroites qui permettent à la vie terrestre de se développer normalement, seules des contingences locales (inversions géomagnétiques et impacts divers) pouvant poser des problèmes sérieux. C'est du moins ce qu'il ressort de l'étude de notre étoile sur les quelques siècles où il a été suivi avec une assiduité sans cesse accrue. Les cycles solaires sont scrutés, disséqués, comparés les uns aux autres, mais en règle générale leur régularité rassure.

Je reparlerai plus longuement du Soleil au chapitre 8, consacré à l'impactisme invisible, car il reste, malgré tout, et de très loin, l'objet céleste le plus dangereux pour la Terre. Ce n'est pas qu'il soit plus violent que les autres étoiles, il est même beaucoup moins violent que certains de ses voisins proches, mais il est incomparablement plus proche de nous. On connaît les deux chiffres arrondis qui concrétisent cette affirmation : distance Soleil-Terre, 8 minutes lumière ; distance Soleil - Proxima Centauri, 4,2 années lumière.

Paradoxalement, le Soleil risque de s'avérer de plus en plus dangereux au fur et à mesure de la complexité technologique de nos civilisations, car déjà l'expérience montre que l'homme est tributaire de ses caprices, mêmes relativement anodins.

L'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994

En juillet 1994, il se produisit un événement unique, très important pour la confirmation que nous vivons d'une manière permanente dans un univers cataclysmique : l'impact d'une vingtaine de fragments d'une comète brisée à la surface de Jupiter. Ce drame cosmique fut observé dans d'excellentes conditions par la quasi-totalité des astronomes du monde entier et il mérite un développement important, pour bien en montrer les différentes phases et bien en appréhender les causes et les conséquences.

La découverte

L'histoire débuta le 23 mars 1993 au mont Palomar (17). Trois astronomes bien connus, Eugene Shoemaker (1928-1997), Carolyn Shoemaker, son épouse, et David Levy photographiaient le ciel avec le Schmidt de 46 cm, à l'occasion d'une séance habituelle de recherche d'astéroïdes (18).

Deux jours après, Carolyn Shoemaker, une experte de l'étude des films au stéréo-microscope, décela sur l'un d'eux la présence suspecte d'un objet diffus, semblable à une comète, mais qui avait la particularité d'être anormalement allongé. Des images obtenues avec une meilleure résolution avec le télescope automatique Spacewatch, à l'observatoire de Kitt Peak, permirent de confirmer cinq condensations différentes, alignées les unes derrière les autres. Il s'agissait donc d'une comète brisée depuis peu. Des observations ultérieures montrèrent en fait que le "chapelet" ne comportait pas cinq, mais bien 21 condensations autonomes qui étaient autant de fragments. Cette comète fut baptisée *Shoemaker-Levy 9*, SL9 en abrégé, puisqu'elle était la neuvième du trio de découvreurs. Chacun des fragments reçut une désignation sous forme d'une lettre allant de A à W (sauf I et O), en commençant évidemment par le premier fragment de la comète.

Etonnamment, les premiers calculs indiquèrent que cette comète brisée était satellisée autour de Jupiter avec une période de l'ordre de deux ans et qu'elle avait été *capturée* par la planète géante, qui du même coup était responsable de la rupture.

L'orbite de la comète et la période avant l'impact

Les éléments orbitaux calculés étaient les suivants pour les différents fragments (éléments osculateurs pour la date du 17 juin 1994 (19)) : demi-grand axe entre 8,04 UA (noyau W) et 8,47 UA (noyau A) ; excentricité entre 0,33 et 0,37 ; inclinaison entre 8,3 et 9,1°. Les valeurs du demi-grand axe peuvent surprendre, mais il s'agit de valeurs *héliocentriques*, car bien que satellisés autour de Jupiter, les fragments de SL9 continuaient de tourner autour du Soleil, en même temps que Jupiter, mais avec une période double. C'est ce qui explique qu'ils venaient à proximité de Jupiter (au périjove) tous les deux ans.

A partir de ces éléments orbitaux, le passé de la comète put être établi de la façon suivante (20). SL9 avait été capturée dans le système de Jupiter vers 1929, sur une orbite terriblement instable qui ne pouvait donc être que très provisoire, puisque les approches à Jupiter avaient lieu tous les deux ans. Le 8 juillet 1992, huit mois seulement avant la découverte, la comète était passée à 1,6 rayon jovien, à l'intérieur de la limite de Roche, et, du fait des effets de marée considérables, elle ne put résister et se brisa en une vingtaine de fragments. On sait qu'une telle approche très serrée d'une comète à l'intérieur de la limite de Roche d'une planète entraîne non seulement la fracture (21), mais aussi cette remarquable structure des fragments en forme de barre ou de chapelet. C'est ce qui s'est passé pour SL9, dont le diamètre avant la rupture devait être de l'ordre de 5 km.

Deux mois après la découverte de SL9, Brian Marsden (1937-2010) annonça l'incroyable nouvelle : entre les 16 et 22 juillet 1994, tous les fragments de la comète allaient, les uns après les autres, percuter Jupiter à très grande vitesse, 60 km/s, le triple de la vitesse considérée comme moyenne en ce qui concerne les impacts classiques d'astéroïdes avec la Terre. Cette vitesse de 60 km/s est égale à 216 000 km/heure, plus de la moitié de la distance Terre-Lune, ce qui est tout à fait considérable.

Les astronomes avaient donc plus d'un an pour préparer l'observation des impacts. Cette période fut l'occasion de quelques constatations intéressantes, puisque l'on vit deux fragments disparaître (J et M) par désintégration, et trois autres se dédoubler (G en G₁ et G₂, P en P₁ et P₂ et Q en Q₁ et Q₂). Cette triple rupture montra bien que ces fragments étaient très friables et qu'une grande partie d'entre eux au moins n'étaient pas constitués de matière solide. On constata aussi que les divers fragments du chapelet s'écartaient régulièrement les uns des autres, de 150 000 km au moment de leur découverte, à près de 5 millions de km avant l'impact, en très bon accord avec les simulations qui prévoyaient un tel scénario.

Les impacts

Les astronomes appréhendaient les impacts. D'autant plus que ceux-ci ne pouvaient être observés en direct, étant situés juste au bord de l'hémisphère visible, mais du mauvais côté. Seules les conséquences des impacts pouvaient être observées un quart d'heure seulement après qu'ils aient eu lieu, mais elles furent spectaculaires, au-delà même de ce qui était espéré.

Ces impacts successifs furent un véritable show cosmique, extraordinaire, inoubliable pour tous ceux qui en ont été les témoins. Dès le 16 juillet 1994, à 20 h 11 temps universel, avec l'impact du fragment A, on sut que le spectacle serait une réussite incomparable (22). Certains fragments n'eurent pas l'éclat attendu (le B par exemple que l'on attendait plus lumineux), mais d'autres furent très remarquables. Le 17 juillet, le fragment G₁, apparemment le fragment majeur, dégagea une énergie considérable. Son impact causa la formation d'un champignon de gaz de plus de 2000 km de hauteur et une tache noire de 25 000 km de diamètre. Plusieurs de ces

taches qui se succédèrent à la suite des différents impacts laissèrent des traces visibles plusieurs semaines dans de bonnes conditions et encore décelables au cours des mois suivants. Mais Jupiter finit par "digérer" ces impacts multiples, somme toute insignifiants à son échelle, et la "surface" traditionnelle finit par reprendre tous ses droits. De très nombreux clichés sont là pour témoigner de cet événement unique, et les multiples mesures prises à l'occasion de la "semaine de juillet 1994" demandèrent plus d'une année pour être totalement déchiffrées, analysées et comprises.

Bilan et conséquences de l'impact de SL9

L'impact de SL9 sur Jupiter a permis d'obtenir de très nombreuses informations sur la composition de la comète et sur celle de la haute atmosphère de Jupiter, mais aussi de tirer des conséquences plus générales sur l'impactisme planétaire. Parmi toutes ces données, on peut en retenir quelques-unes particulièrement significatives.

1. Il existe encore actuellement des comètes de taille kilométrique capables de venir heurter les planètes (surtout les géantes, mais aussi les autres) et le Soleil.
2. Ces objets ont été capturés récemment, car ils ne peuvent circuler dans le Système solaire intérieur depuis plusieurs millions d'années. A noter que pour SL9 il s'est passé seulement 65 ans entre la capture (1929) et l'impact sur Jupiter (1994), et que cet impact a eu lieu lors de l'approche suivant celle de la rupture (1992).
3. Une forte approche à l'intérieur de la limite de Roche de Jupiter a irrésistiblement brisé SL9 en une vingtaine de fragments, qui se sont constitués en "chapelet". On ignore la masse perdue lors de la rupture, de nombreux petits fragments ont dû être capturés par Jupiter lors de cette approche décisive ou se désintégrer en poussière cosmique.
4. L'émission lors de l'impact de raies atomiques (Li, Na, K, Ca, Mg et Fe) et moléculaires (S₂, CS₂, CS, H₂S, H₂O) a prouvé l'hétérogénéité de la composition de la comète, mais les spécialistes ont noté une probable interférence importante avec l'atmosphère de Jupiter. Il a quand même été noté une très faible proportion d'eau et un pourcentage de soufre supérieur à celui prévu par les modèles. L'absence presque totale d'eau pourrait s'expliquer par la violence des chocs qui aurait pulvérisé la glace, principal composant de la comète, mais aussi décomposé les molécules d'eau qui se seraient recombinaées très rapidement pour former d'autres constituants, principalement des constituants carbonés (23).
5. La nature exacte de SL9 a suscité bien des questions : comète ou astéroïde ? Le fait même que tous les fragments avaient leur propre chevelure et leur propre queue semble indiquer une origine cométaire quasi certaine, ainsi que la fragilité de certains fragments qui se sont littéralement volatilisés, conséquence d'une mauvaise cohésion interne.

6. Le diamètre de SL9 avant la fragmentation de 1992 et ceux des fragments ultérieurs n'ont pu être déterminés avec une grande précision. Le diamètre de 5 km pour SL9 avant la fragmentation, invoqué par les meilleurs spécialistes, semble très raisonnable. Pour ce qui est de l'ensemble des fragments survivants à la fragmentation (il est sûr qu'il y a eu un certain déchet de masse), un diamètre global de 3 ou 4 km paraît bien correspondre à la masse de la vingtaine de fragments qui ont effectué un tour supplémentaire autour de Jupiter. Le fragment majeur, probablement le noyau G (qui s'est scindé en G₁ et G₂, mais celui-ci était minuscule), atteignait au moins 1,5 km, peut-être même 2 km, compte tenu de l'énorme énergie qu'il a engendrée lors de l'impact. Mais il était nettement plus petit que les 4 km primitivement annoncés. Quelques autres fragments pouvaient atteindre 1 km, les autres étaient de taille hectométrique. S'il en existait encore de plus petits (moins de 100 mètres), ils n'ont pas été détectés.

7. La densité des fragments était de l'ordre de 0,2 à 2,0 g/cm³ au maximum, légèrement variable très probablement d'un fragment à l'autre selon leur composition exacte. Les spécialistes ont signalé qu'avec des fragments de 0,5 à 1 km, les masses allaient de 5 x 10¹⁰ kg à 4 x 10¹² kg. Compte tenu de la vitesse très importante (60 km/s), l'énergie cinétique était de l'ordre de 4 x 10²⁰ à 3 x 10²² joules, soit l'équivalent de 80 000 à 6 millions de mégatonnes de TNT.

Autres impacts cométaires possibles

L'impact de SL9 sur Jupiter en juillet 1994 poussa les astronomes à se demander si cet événement avait eu des précédents. En cherchant bien, certains historiens de l'astronomie se remémorèrent des observations suspectes sur les planètes qui pourraient avoir été les conséquences d'impacts non répertoriés comme tels.

Le 5 décembre 1690, Jean-Dominique Cassini (1625-1712), le premier directeur de l'observatoire de Paris, observa une grosse tache noire suspecte presque au centre de la zone équatoriale de Jupiter qui n'existait pas lors de ses observations précédentes (24). Il suivit avec une attention particulière l'évolution de cette tache qui, de circulaire, se transforma avant de se scinder en plusieurs petites taches informes. Dans son dessin conservé à l'observatoire de Paris, on voit les formes fluctuantes de la tache pour les 5, 14, 15, 16, 19 et 23 décembre 1690. Les nuits suivantes où Cassini put de nouveau observer Jupiter, tout était rentré dans l'ordre, l'atmosphère de la planète ayant "digéré" l'impact. Cette observation, pourtant connue depuis longtemps, était quasiment oubliée, noyée dans un flot d'informations toujours plus important. Cette tache et ses déformations successives, étalées sur près de trois semaines, semblent bien correspondre à l'impact unique d'une petite comète active ou d'un astéroïde cométaire. En effet, des simulations sur ordinateur ont confirmé que l'évolution de la tache telle qu'observée et décrite par Cassini est bien rendue par un tel impact.

Un autre impact répertorié comme possible eut (peut-être) lieu en 1785. Il fut observé et décrit par Johann Schröter (1745-1816) (25). Le 26 octobre 1785, l'astronome allemand observa pour la première fois deux remarquables points noirs à la surface de Jupiter, observation qu'il répéta les semaines suivantes jusqu'au 26 février 1786, les points devenant diffus, ce qui lui parut étonnant car inhabituel. Alors, comète ou simples phénomènes atmosphériques sur Jupiter ? Le doute subsiste, avec des astronomes partagés sur le sujet. Mais la répétition de tels événements, trois en quatre siècles, sans compter évidemment ceux qui n'ont pas été observés, laisse à penser que l'impact de comètes sur Jupiter pourrait être en fait un phénomène assez fréquent.

Le volcanisme dans le Système solaire

Les sondes spatiales ont été, à partir des années 1960, les "yeux" des Terriens et elles ont totalement révolutionné les connaissances que l'on avait sur les planètes et les satellites. Ces sondes américaines et soviétiques ont montré clairement que le catastrophisme planétaire était d'une double nature : extérieur avec des traces de l'impactisme, et interne avec des traces du volcanisme que génèrent (ou ont généré dans le passé) de nombreux astres du Système solaire (26).

On savait bien depuis longtemps, et notamment par l'étude télescopique de Jupiter, que la majorité des planètes génèrent leurs propres cataclysmes, comme tous les éléments de l'Univers, à quelque niveau qu'ils se situent dans la hiérarchie (de par leur masse). Comme je l'ai déjà expliqué à plusieurs reprises, le cataclysme est l'une des raisons d'être dans l'Univers, l'une des causes de son évolution, et le Système solaire, à sa (très) modeste échelle, participe à "l'œuvre commune". Le volcanisme est l'un des vecteurs de catastrophes, parmi beaucoup d'autres. Nous allons voir très rapidement dans cette section ce qu'il en est de ce volcanisme dans le Système solaire, qui peut être soit fossile, soit quasi contemporain, soit actuel et même *permanent* comme le montre l'extraordinaire exemple que constitue Io, le satellite de Jupiter.

Mercure et la Lune, le volcanisme fossile

On connaît Mercure par les clichés transmis par la sonde *Mariner 10* entre 1973 et 1974. C'est une planète criblée de cratères d'impact qui n'a eu qu'une très courte vie active et une activité volcanique minimale, avant de disparaître totalement. Les rares traces volcaniques sont quelques plaines lisses, probablement basaltiques, vestiges d'écoulements très anciens et quelques dômes associés à des fissures.

Autre astre définitivement mort : la Lune. L'étude des premiers échantillons lunaires, ramassés dans la mer de la Tranquillité en juillet 1969, était attendue avec impatience par les spécialistes américains. Les tests révélèrent que les échantillons choisis par les astronautes d'*Apollo 11* étaient des roches volcaniques, avec des âges compris entre 3,65 et 3,85 milliards

d'années, d'une ancienneté comparable à celle des plus vieilles roches terrestres encore accessibles. Les mers lunaires étaient donc bien des dépôts basaltiques.

La mission suivante, celle d'*Apollo 12* en novembre 1969, permit de récolter d'autres spécimens dans l'océan des Tempêtes. Là encore, l'âge des basaltes s'avéra très ancien (de 3,18 à 3,30 milliards d'années). La différence d'âge entre les deux sites fut considérée comme fondamentale, car elle prouve que les magmas lunaires n'ont pas été créés instantanément par des impacts géants qui ont creusé les bassins, mais qu'ils ont été créés plus tard en plusieurs vagues chronologiquement et aussi chimiquement nettement différenciées. On pense que le volcanisme lunaire s'est tari de lui-même il y a environ 2,7 milliards d'années.

Mars et Vénus, le volcanisme quasi contemporain

Mars et Vénus ont eu une activité volcanique très importante. Celle de Mars a été détectée par la sonde spatiale *Mariner 9*, en novembre 1971, qui a repéré quatre volcans géants (baptisés Arsia Mons, Pavonis Mons, Ascraeus Mons et Olympus Mons) qui pourraient être assez récents à l'échelle astronomique (de 700 MA pour Arsia Mons, 300 MA pour Pavonis Mons, 100 MA pour Ascraeus Mons et seulement 30 MA pour les couches terminales d'Olympus Mons). De nombreux autres volcans plus petits existent aussi sur Mars, mais apparemment la planète rouge n'a pas actuellement de volcanisme actif.

Ce sont les sondes soviétiques *Venera 9* et *Venera 10* qui obtinrent en 1975 les premières photos noir et blanc de la surface de Vénus. Mais ce sont les formidables images radar obtenues par la sonde américaine *Magellan*, au début des années 1990, qui permirent d'obtenir une cartographie complète, forcément complexe, qui s'est révélée passionnante. Deux structures impressionnantes, Rhea Mons au nord et Theia Mons au sud, s'avérèrent être d'une nature volcanique incontestable, mais aucun volcanisme contemporain n'a pu être mis en évidence d'une façon certaine parmi les 141 volcans de plus de 100 km de diamètre recensés. Deux grandes caldées effondrées : Colette (80 x 120 km) et Sacajawea (140 x 280 km) sont des vestiges d'anciens volcans. Sans qu'on puisse la dater avec certitude, l'activité volcanique de Vénus pourrait avoir été très jeune à l'échelle astronomique, quasiment contemporaine même.

Io et Triton, le volcanisme actuel

C'est en mars 1979 que la sonde *Voyager 1* photographia Io, le satellite de Jupiter (le plus proche des satellites galiléens), avec en prime un événement exceptionnel : une éruption volcanique en direct, et la révélation que, contrairement à ce qui se passe pour les autres satellites (notamment ceux criblés de cratères d'impact), toutes les taches révélées sont des traces de volcans actifs. Io, en effet, est le satellite le plus actif que l'on connaisse : l'activité volcanique *incessante* transforme la surface de la planète en

quelques centaines d'années seulement. Du coup, Io, bien qu'il ne soit au sens strict qu'un satellite, fut surnommé la planète-volcan.

Le plus grand de ces volcans a reçu le nom de Pélé, c'est celui-là même qui fut photographié par *Voyager 1*, un fantastique volcan de 1000 km de diamètre, d'une altitude de 280 km qui éjecte sa matière et ses gaz à 930 mètres par seconde. Et pourtant, Io a un diamètre (3680 km) de peu supérieur à celui de la Lune (3470 km). Cet astre, tout à fait étonnant, symbolise le mieux le cataclysme planétaire parmi tous les objets du Système solaire, bien que le mécanisme de l'activité soit différent de celui des autres astres à activité volcanique. En règle générale, cette activité est basée principalement sur la désintégration d'atomes radioactifs au sein d'un manteau minéral. Pour Io, l'action principale est l'effet de marée, du fait de sa proximité de Jupiter et de son important champ de gravité qui entraîne un échauffement interne considérable. On a calculé que la chaleur induite par effet de marée est de l'ordre de 10^{12} joules par seconde, dix fois plus que la chaleur générée par la radioactivité lunaire. On a noté aussi la présence de soufre et de dioxyde de soufre à grande échelle et une faible proportion d'autres gaz. C'est ce soufre qui donne à Io son aspect coloré si spectaculaire.

La sonde *Voyager 2*, elle, révéla une activité volcanique actuelle pour Triton, le gros satellite (2700 km de diamètre) rétrograde de Neptune, lors de son passage dans le système de cette planète en août 1989. Le peu de cratères d'impact visibles montra que la surface se renouvelait régulièrement du fait d'une importante activité cryovolcanique. Des geysers furent mis en évidence, grimant jusqu'à 8 km d'altitude. On pense qu'ils seraient dus à une vaporisation, au niveau local, d'azote liquide s'échappant du sous-sol gelé de Triton.

Le volcanisme, un phénomène permanent dans le Système solaire

On connaît depuis toujours le volcanisme terrestre qui est le phénomène le plus énergétique connu sur notre planète. Certaines grandes éruptions géantes récentes, comme celle du Tambora en 1815, ont libéré une énergie de l'ordre de 10^{20} joules. Les sondes spatiales ont montré que Vénus et Mars avaient eu des éruptions gigantesques quasi contemporaines et que des satellites comme Io et Triton avaient encore une activité volcanique permanente.

Ainsi on a la preuve définitive que le volcanisme est l'une des sources classiques et universelles de cataclysme dans l'Univers. Il est obligatoire que le volcanisme existe partout, et bien sûr dans certains cas dans des proportions sans commune mesure avec celles observées sur notre système. Un volcan, comme celui d'Olympus Mons sur Mars, le plus important de tout le Système solaire, a dû libérer des énergies inimaginables lors de ses éruptions paroxystiques et envelopper l'atmosphère martienne d'un voile épais qui a peut-être demandé plusieurs années pour se dissiper. *L'hiver*

"*post-catastrophe*" a en fait déjà eu lieu sur toutes les planètes, et cela pour des causes multiples : volcanisme (hiver volcanique), impactisme (hiver d'impact), tremblements de terre, etc.

Le cataclysme et le chaos

L'apparition des ordinateurs sophistiqués permettant des calculs d'une complexité inouïe, hors de portée des anciens calculateurs, pourtant valeureux souvent, a permis de mettre progressivement en évidence un nouveau facteur possible de cataclysme : *le chaos* (27/28).

" Le rêve d'une certitude céleste a été brisé par les limitations des mathématiques et par l'émergence du chaos dans la mécanique du ciel. " (29)

Outre le fait qu'il interdit à jamais de reconstituer avec précision le passé des différentes planètes et celui des astéroïdes, le chaos fait réfléchir sur l'incertitude de l'avenir : il est quasiment impossible de prévoir avec précision la position des astéroïdes et des comètes dangereux quelques siècles seulement à l'avance. Les calculs ne sont strictement valables que pour un ou deux siècles, ce qui est assez peu.

Le chaos, en outre, déqualifie d'avance toute prévision de collision pour les millénaires à venir. Le danger ne peut être quantifié que pour le court terme, ce qui est sans doute préférable d'ailleurs pour éviter la prolifération de "prophéties" du genre de celles de Nostradamus, car la *comète* et l'*astéroïde* vont être les nouveaux instruments des sectes apocalyptiques pour justifier leur raison d'être, maintenant que les alignements et conjonctions de planètes sont totalement discrédités.

J'aurai à reparler à plusieurs reprises de l'importance du chaos dans le Système solaire dans certains des chapitres ultérieurs. C'est une donnée importante à prendre obligatoirement en compte quand on étudie le cataclysme d'origine cosmique, et même plus simplement la présence de l'homme sur la Terre, comme l'a brillamment montré l'astronome français Jacques Laskar (30). Mais il faut bien le rappeler : le chaos n'est qu'un élément parmi d'autres.

Pour terminer ce chapitre consacré à l'universalité de l'impactisme et du catastrophisme, il faut encore rappeler ce qui est essentiel : le cataclysme est bien la règle, ici et ailleurs, *partout* ; hier, aujourd'hui et demain, *toujours*. Il serait donc utopique de croire que la Terre, pour une quelconque raison, ait été (et soit encore) privilégiée par rapport aux autres astres du Système solaire et d'ailleurs. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner de ce cataclysme *universel*. Il est la condition sine qua non de l'évolution. Sans lui, nous ne serions pas là pour en parler et pour philosopher à son sujet.

Notes

1. H. Reeves, *Poussières d'étoiles* (Seuil, PS 100, 1994). Citation pp. 81-82.
2. H. Reeves, *op. cit.*, citation pp.128-129.
3. H. Reeves, *L'origine du système solaire*, La Recherche, 60, pp. 808-817, 1975.
4. C. Perron, *Météorites, de Mars et d'ailleurs*, L'Astronomie, 111, pp. 146-159, 1997.
5. G. Wetherill, *La formation de la Terre par accrétion de planétoïdes*, Pour la Science, 46, pp. 12-23, 1981.
6. La masse totale de ce système : $1,2 \times 10^{28}$ grammes ($1,2 \times 10^{26}$ g x 100 planétoïdes) est égale à celle des quatre planètes intérieures + la Lune. Elle est donc couramment utilisée dans les simulations destinées à expliquer la formation des planètes telluriques.
7. A.H. Delsemme, J.-C. Pecker et H. Reeves, *Pour comprendre l'Univers* (Flammarion, Champs 234, 1990).
8. J.K. Beatty and A. Chaikin (eds), *The new solar system* (Sky Publishing Corporation and Cambridge University Press, 1990).
9. A. Rükl, *Atlas de la Lune* (Gründ, 1993).
10. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 10)*, Observations et Travaux, 39, p. 3, 1994.
11. F. Link, *La Lune* (PUF, QS 1410, 1981).
12. W.K. Hartmann, *Cratering in the solar system*, Scientific American, 236, pp. 84-99, 1977.
13. Th. Montmerle et N. Prantzos, *Soleils éclatés, les supernovae* (Presses du CNRS, 1988).
14. D. Leglu, *Supernova* (Plon, 1989).
15. S. Jodra, *Hypernova, l'explosion qui a secoué l'Univers*, Ciel et Espace, 338, pp. 62-66, juillet 1998.
16. K.S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps* (Flammarion, 1997). Titre original : *Black holes and times warps* (1994). Ce gros livre (654 pages) savant est une mine d'or sur le sujet.

17. D.H. Levy, *The quest for comets* (Oxford University Press, 1995). David Levy (1948) est l'un des découvreurs de la comète Shoemaker-Levy 9.
18. Eugene Shoemaker (1928-1997) était à la fois un géologue, spécialiste des astéroïdes, et un astronome qui s'intéressa aux astéroïdes qui frôlent la Terre dès le début des années 1970.
19. Minor Planet Circulars (MPC) n^{os} 23650 et 23651 du 23 juin 1994.
20. P. Drossart, *L'impact de la comète P/Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter*, L'Astronomie, 108, pp. 110-116, 1994.
21. J. Spencer and J. Mitton (eds), *The great comet crash : the impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter* (Cambridge University Press, 1995). Un livre collectif (12 auteurs), magnifiquement illustré, qui retrace parfaitement l'histoire de cette comète exceptionnelle.
22. P. Drossart, J. Crovisier, E. Lellouch, Y. Leblanc et G.A. Dulk, *La collision de la comète P/Shoemaker-Levy 9 et de Jupiter : un bilan scientifique des observations*, L'Astronomie, 109, pp. 74-83, 1995.
23. J. Crovisier et Th. Encrenaz, *Les comètes, témoins de la naissance du Système solaire* (Belin-CNRS Editions, 1995).
24. J.K. Beatty, *A "comet crash" in 1690 ?*, Sky and Telescope, p. 111, avril 1997. Cette observation capitale de Cassini semble indiscutable et prouve la fréquence, totalement insoupçonnée auparavant, des impacts de comètes actives sur les planètes géantes, qui servent de "premier barrage" de protection pour les quatre planètes intérieures.
25. S.J. O'Meara, *Schröter and Jupiter's dark spots*, Sky and Telescope, pp. 98-100, july 1996. Johann Schröter était l'un des meilleurs observateurs de la fin du XVIII^e siècle et un spécialiste de Jupiter. De nombreux astronomes modernes ont tendance à croire que ses observations de 1785-1786 correspondent bien à des impacts cométaires.
26. C. Frankel, *Les volcans du Système solaire* (Armand Colin, 1993).
27. Pour la Science (collectif), *Le chaos* (HS 6, 1995). Un dossier *Pour la Science* qui explique les différentes (et nombreuses) implications du chaos dans la science.
28. I. Peterson, *Le chaos dans le Système solaire* (Pour la Science, 1995). Titre original : *Newton's clock : chaos in the Solar System* (1993).
29. I. Peterson, op. cit., citation p. 5.
30. J. Laskar, *La Lune et l'origine de l'homme*, Pour la Science, HS 6, *Le chaos*, pp. 48-54, 1995.

CHAPITRE 6

LES ASTÉROÏDES QUI FRÔLENT LA TERRE

Les astéroïdes dans le Système solaire

On sait que le Système solaire (1/2) se compose principalement du Soleil, des planètes et de leurs satellites. Mais on connaît également quatre grandes catégories d'objets secondaires qui sont plus ou moins liées entre elles : les *astéroïdes*, les *comètes*, les *météorites* et les *poussières* (3).

Les astéroïdes ou petites planètes (4/5) sont des petits objets qui circulent principalement entre les orbites de Mars et de Jupiter, les quatrième et cinquième planètes par ordre d'éloignement du Soleil, mais aussi en deçà et au-delà de cette ceinture principale, notamment dans la ceinture de Kuiper. On en connaît plusieurs centaines de milliers (6), découverts visuellement jusqu'en 1892 par les chasseurs d'astéroïdes (7), sur des plaques photographiques ensuite (8) jusqu'au milieu des années 1980 et depuis avec des caméras CCD couplées avec des télescopes (9). Mais surtout, on sait depuis longtemps qu'ils existent par dizaines de millions (10).

Dans la ceinture principale, leurs diamètres varient de quelques mètres à 940 km pour le principal d'entre eux, Cérès, qui est connu depuis 1801 et qui est considéré comme une planète naine depuis 2006. Dans la ceinture de Kuiper, dont font partie Pluton et Charon, on connaît des astéroïdes, les *objets de Kuiper* (les KBO pour *Kuiper-Belt Objects*), qui dépassent souvent les 1000 km de diamètre. Les trois principaux sont Haumea, Makemake et Eris dont le diamètre est voisin de 2500 km. Tous les trois sont, eux aussi, des planètes naines.

On sait qu'il y a continuité entre l'espèce *planète* et l'espèce *météorite*, puisqu'il y a tous les intermédiaires possibles, que l'on appelle parfois des *météoroïdes*. Le Système solaire est donc peuplé de milliards d'objets de toutes tailles, avec bien sûr une prépondérance marquée pour les petits objets. Il est important d'insister sur ce point fondamental : le Système solaire n'est pas un système propre, avec son étoile, ses huit planètes et quelques dizaines de satellites. Il est sillonné par toutes sortes de débris qui se meuvent sur des orbites qui peuvent être beaucoup plus excentriques que celles des planètes. Ces débris ont donc des possibilités d'approches aux astres principaux et les collisions sont fréquentes à l'échelle astronomique.

Les astéroïdes ont joué, et jouent encore, un rôle important dans le Système solaire et ils sont, avec les comètes, la clé de l'impactisme planétaire, dont l'impactisme terrestre n'est qu'un cas particulier, celui qui concerne notre

planète. Les dizaines de milliers de clichés transmis par les sondes spatiales ont montré la réalité de cet impactisme planétaire, puisque toutes les planètes et tous les satellites à surface solide (11), sauf ceux dont la surface est constamment renouvelée par des phénomènes internes (notamment Io et Europe, deux des quatre gros satellites de Jupiter), sont criblés de cratères d'impact de toutes tailles et de tous âges.

Définitions et classification des différentes catégories d'objets

Il est nécessaire de rappeler quelques définitions concernant les sigles, les types et les sous-types basés sur certaines caractéristiques orbitales particulières (12). Le nombre d'objets très important et des caractéristiques et une origine différentes nécessitent une classification cohérente et suffisamment précise.

Ne pas confondre NEA, EGA et PHA

On appelle **NEA** (sigle de *Near-Earth Asteroids*), les *astéroïdes proches de la Terre*, ceux qui ont une distance périhélique inférieure à 1,30 UA). Le statut de NEA dépend donc uniquement de cette particularité.

On appelle **EGA** (sigle de *Earth-Grazing Asteroids*), les *astéroïdes qui frôlent la Terre*, ceux qui ont une distance minimale à l'orbite terrestre inférieure à 0,100 UA, soit 14,96 MK, ou 15 MK en chiffres ronds. Plus de 60 % des NEA répertoriés sont aussi des EGA.

Ces deux appellations recouvrent des données différentes : la valeur du périhélie ($q < 1,30$ UA) pour les premiers et la distance minimale à la Terre ($D_m < 0,100$ UA) pour les seconds.

On appelle **PHA** (sigle de *Potentially Hazardous Asteroids*), les *astéroïdes potentiellement dangereux* (pour la Terre) qui ont une distance minimale à l'orbite terrestre $< 0,050$ UA et $H < 22,1$ (soit plus de 130 mètres de diamètre moyen pour un objet silicaté de type S, mais avec une fourchette de 100 à 200 mètres selon le type physique et l'albédo) . Ce sont eux que l'on cherche à recenser d'une manière quasi exhaustive afin de les détruire (ou les détourner) si le besoin s'en faisait vraiment sentir. Les statistiques montrent que 1 NEA sur 7 est aussi un PHA, ce qui est un pourcentage très important. On en connaît plus de 1150 fin 2011.

Trois types différents

Depuis 1979, on reconnaît trois types différents de NEA :

– **type Aten** : NEA qui circulent en moyenne à l'intérieur de l'orbite terrestre (a est inférieur à 1,000 UA) ;

- **type Apollo** : NEA qui pénètrent à l'intérieur de l'orbite terrestre au périhélie (a est supérieur à 1,000 UA et q est inférieur à 1,000 UA) ;
- **type Amor** : NEA dont le périhélie est situé entre 1,000 et 1,30 UA).

Seuls les NEA des types Aten et Apollo peuvent croiser l'orbite terrestre. Ce sont les *Earth-crossers*. En français, on les appelle les *géocroiseurs* (13).

Il est important de signaler que plusieurs objets de type Amor deviennent à certaines époques de type Apollo, du fait de l'augmentation de leur excentricité qui leur permet d'avoir $q < 1,000$ UA, et inversement des objets de type Apollo deviennent de type Amor. Quelques objets dont le mouvement est en libration avec celui de la Terre passent également du type Aten au type Apollo et inversement. Leur demi-grand axe est légèrement inférieur ou supérieur à $a = 1,000$ UA selon les époques. La classification en trois types n'est donc valable que pour la période actuelle.

On trouve des EGA dans les trois catégories d'objets. Il faut bien se rappeler que tous les objets Aten, Apollo et Amor sont des NEA, mais seulement une partie d'entre eux sont des EGA.

Les sous-types sont fonction des demi-grands axes

Pour bien différencier des orbites qui peuvent être de dimensions assez différentes, on distingue quatre sous-types (14) pour les types Apollo et Amor, en fonction de la valeur du demi-grand axe a , étant entendu que le type Aten est également un sous-type, puisque basé sur une valeur particulière de a . Ce sont :

- *le sous-type 1* qui concerne les objets qui circulent en moyenne entre les orbites de la Terre et Mars (a compris entre 1,000 et 1,523 UA) ;
- *le sous-type 2* qui concerne les objets qui circulent en moyenne entre l'orbite de Mars et l'anneau principal des astéroïdes (a compris entre 1,524 et 2,064 UA) ;
- *le sous-type 3* qui concerne les objets qui circulent en moyenne dans l'anneau principal des astéroïdes et qui sont donc des membres de cet anneau (a compris entre 2,065 et 3,582 UA) ;
- *le sous-type 4* qui concerne quelques rares astéroïdes qui circulent en moyenne à l'extérieur de cet anneau principal ($a > 3,582$ UA).

A noter donc que seuls les astéroïdes de sous-type 3 sont membres de l'anneau principal qui s'étend sur 1,50 UA (1 fois et demie la distance de la Terre au Soleil). Cette utilisation des sous-types paraît superflue à certains spécialistes, mais ils permettent de faire immédiatement la distinction entre des orbites qui peuvent être très différentes.

Des astéroïdes et des noyaux de comètes

Enfin, concernant l'origine des NEA, on distingue les NEA *planétaires*, qui sont des vrais astéroïdes, des fragments d'objets planétaires plus gros brisés à la suite de collisions dans l'espace, et les NEA *cométaires*, qui sont des noyaux de comètes *éteintes* ou *en sommeil* d'apparence astéroïdale.

On connaît quelques objets qui ont présenté une activité cométaire à certaines époques, mais qui sont aujourd'hui des astéroïdes, puisque ne présentant plus d'activité cométaire décelable. Ils sont catalogués à la fois comme comète et comme astéroïde.

L'historique des découvertes de NEA

L'apparition de la méthode photographique de recherche des astéroïdes dans la dernière décennie du XIX^e siècle a littéralement révolutionné leur étude. Cette nouvelle méthode de détection, grâce surtout, dans un premier temps, au travail acharné des deux pionniers que furent Max Wolf (1863-1932) et Auguste Charlois (1864-1910), a rapidement permis de se rendre compte que le nombre total des astéroïdes était quasiment illimité, et que certains d'entre eux ne restent pas cantonnés entre les orbites de Mars et de Jupiter. Au fil des décennies, on en découvrit certains qui ont des distances moyennes inférieures à celle de Mars et même à celle de la Terre.

En 1898, la découverte fortuite d'Eros (15), par Gustav Witt (1866-1946), fut une grosse surprise pour les astronomes de l'époque qui se trouvèrent en présence d'un astéroïde ayant une distance moyenne ($a = 1,458$ UA) plus faible que celle de Mars ($a = 1,524$ UA) et une distance périhélique ($q = 1,133$ UA) tout à fait imprévue. Les calculs montrèrent, en outre, qu'Eros pouvait s'approcher à 0,15 UA de la Terre, soit 22 millions de km, ce qu'il avait fait en janvier 1894, quatre ans avant sa découverte.

Une découverte importante mal exploitée

J'ai expliqué au chapitre 4 l'importance d'objets comme Apollo, Adonis et Hermes, photographiés dans les années 1930, et qui établissaient enfin la preuve que la Terre est constamment frôlée par des EGA, et que souvent, à l'échelle astronomique, certains d'entre eux percutent la Terre. Ce fut une véritable révélation pour les astronomes, mais malheureusement la guerre brisa l'élan pour beaucoup plus de dix ans.

En 1947, les programmes d'observation reprirent progressivement et permirent des découvertes dans presque tous les domaines de l'astronomie. Les astéroïdes, par contre, furent quasiment mis à l'index et devinrent *la vermine du ciel*. Les découvertes chutèrent d'une façon durable. Seuls les astéroïdes vraiment particuliers étaient pris en compte dans les observatoires, et encore pas toujours, si bien que des objets très intéressants furent perdus immédiatement, faute d'un suivi indispensable.

Ce fut le cas en 1947 avec un objet baptisé 1947 XC, observé deux nuits seulement en décembre et laissé à l'abandon, et donc tout de suite perdu. Il ne fut retrouvé accidentellement qu'en 1979 et s'est avéré d'un intérêt extraordinaire. C'est le fameux astéroïde cométaire Oljato, frère jumeau de la comète périodique P/Encke, dont j'aurai l'occasion de reparler. Il s'approche de l'orbite terrestre à 120 000 km seulement et frôle aussi Vénus et Mars.

Dans les années suivantes, quelques découvertes d'objets intéressants eurent lieu comme sous-produits d'autres programmes, notamment celles d'Icarus en 1949, de Geographos en 1951 et de Quetzalcoatl en 1953. Plusieurs de ces nouveaux objets, suivis trop peu de temps, durent attendre de nombreuses années pour être redécouverts et numérotés, car, jusqu'à la fin des années 1960, les astéroïdes n'eurent pas la cote. Seul le remarquable *Palomar-Leiden Survey* (PLS) (16) de septembre et octobre 1960 émergea d'une médiocrité inacceptable.

Le renouveau des années 1970

Tout changea à partir de 1971, avec les premières recherches systématiques entreprises par Eugene Shoemaker (1928-1997) et Eleanor Helin (1932-2009) à Palomar, recherches qui connurent un succès imprévu par son ampleur. En 1980, on connaissait une soixantaine de NEA, chiffre qui, contre toute attente (même celle des spécialistes les plus optimistes), allait passer à près de 150 à la fin des années 1980. En une seule décennie, le nombre des objets connus avait largement plus que doublé. L'année 1989 allait être extraordinaire avec la découverte d'objets comme Toutatis (17), Xanthus, Asclepius (qui battit le record d'approche de Hermes), Castalia et Minos. Les spécialistes comprirent que les astéroïdes pouvant s'approcher de la Terre étaient beaucoup plus nombreux que ce qu'on avait imaginé et que les objets découverts étaient des objets parmi d'autres. Le premier objectif fut les 1000 NEA à découvrir.

Spacewatch ou la révolution des caméras CCD

Le début des années 1990 vit enfin la réussite (après plusieurs années de tâtonnements) pour le télescope automatique *Spacewatch*, imaginé par Tom Gehrels (1925-2011) et mis en station à l'observatoire de Kitt Peak. C'est le début des découvertes sans support film, ce qui est une révolution aussi importante que celle qui fit le bonheur de Wolf et Charlois dans les années 1890. Les caméras CCD enregistrent automatiquement sur ordinateur les positions d'objets très faibles, parmi lesquels de nombreux NEA. La réussite fut si extraordinaire pour Gehrels et ses associés, parmi lesquels James Scotti et David Rabinowitz, que plus de 350 objets étaient répertoriés fin 1994. C'est un triplement des découvertes qu'ont permis les caméras CCD. On a dépassé les 500 NEA (chiffre inimaginable vingt ans auparavant) en 1997, un an avant le centenaire de la découverte d'Eros.

Les années 1995, 1996 et 1997 ont vu la découverte de plus de 150 nouveaux NEA (près de 50 par an en moyenne), avec l'apparition de

nouvelles équipes spécialisées performantes (NEAT et surtout LINEAR). 1998 a été l'année de l'explosion avec plus de 200 découvertes. On est entré alors dans une période de banalisation, où seule une découverte sortant vraiment de l'ordinaire, comme celle de 1997 XF11, EGA de taille kilométrique, soupçonné d'être un danger pour la Terre dans un proche avenir, fait encore parler, en dehors du milieu des chercheurs spécialisés. L'annonce d'une très forte approche en 2028 pour 1997 XF11 a été le prétexte d'une campagne de presse incroyable dont je reparlerai au chapitre 17.

Le début des années 2000 a été révolutionnaire avec plusieurs centaines de découvertes chaque année. Depuis 2008, c'est plus de deux nouveaux NEA par jour en moyenne qui sont recensés. Le danger que représentent tous ces objets, dont certains sont réellement menaçants à l'échelle du millénaire, est aujourd'hui pris en compte par les scientifiques mais aussi par les militaires américains, comme je l'ai expliqué au chapitre 4.

Désignations provisoires et noms définitifs

La majorité de tous ces NEA est suivie assez régulièrement, mais quelques-uns (surtout les plus petits) observés au cours d'une approche unique et non retrouvés par la suite sont considérés comme perdus (18). C'est un peu le revers de la médaille, on sait qu'une bonne partie des objets recensés ne pourront pas être suivis en permanence.

Quand les NEA ont été suivis lors de trois apparitions différentes, ils sont numérotés et reçoivent un nom définitif, souvent mythologique. Le problème des noms des astéroïdes, qui a été longtemps un vrai casse-tête, a été résolu par Lutz Schmadel et ses associés avec le *Dictionary of minor planet names* (19) qui répertorie les noms des objets baptisés.

Les NEA qui n'ont été suivis qu'au cours d'une seule approche se contentent d'une désignation provisoire, formée du millésime de l'année et de deux lettres distinctives, avec quand c'est nécessaire un indice additionnel. On connaît donc des NEA qui sont connus sous leur désignation provisoire (20), comme par exemple 1950 DA, 1979 XB, 1987 SF3 et 1997 XF11. Des spécialistes (21) s'occupent spécialement de tous ces petits astres dont le suivi régulier demande un travail considérable, heureusement facilité par l'apparition d'ordinateurs et de logiciels spécialisés capables de calculer rapidement des éléments orbitaux et des éphémérides fiables.

Les orbites des NEA

Plus de 9350 NEA sont connus fin 2012. Leurs orbites peuvent être très différentes, tant en ce qui concerne les demi-grands axes, les excentricités, les inclinaisons, les périhélies et les orientations dans l'espace. Mais il faut bien savoir que rien n'est immuable et que ces éléments varient avec le temps. Les pourcentages de chaque type restent constants, ce qui indique qu'ils représentent assez bien la distribution réelle de tous ces objets.

Type Aten. On connaît près de 750 NEA (8 % du total) qui circulent en moyenne à l'intérieur de l'orbite terrestre ($a < 1,000$ UA et $P < 1,00$ an). On les observe près de l'aphélie, quand ils ne sont pas noyés dans le rayonnement solaire. Plusieurs de ces objets peuvent frôler Vénus et même Mercure, et ils sont les principaux impacteurs de ces deux planètes.

Type Apollo. Plus de 4650 objets (50 % du total) de ce type sont recensés. Ils se répartissent en trois sous-types avec une prédominance marquée pour les objets circulant en moyenne entre la Terre et Mars (sous-type 1), même si les objets à orbite plus grande sont assez nombreux. Les excentricités sont très variables, elles peuvent être faibles pour les objets de sous-type 1, alors qu'elles sont toujours fortes pour les objets de sous-type 3. Les excentricités $e > 0,70$ ne sont pas rares, certains étant le fait de fragments de Hephaistos.

Type Amor. Plus de 3950 objets (42 % du total) ne pénètrent pas à l'intérieur de l'orbite terrestre, pour la période actuelle, mais s'en approchent au périhélie. La majorité sont membres de l'anneau principal (sous-type 3), mais on connaît de nombreux objets circulant entre la Terre et Mars (sous-type 1) sur une orbite à faible excentricité. Beaucoup d'entre eux sont facilement accessibles de la Terre et pourront être exploités dans l'avenir par nos descendants en mal de ressources minières.

Les sous-types. Les sous-types 1, 2 et 3 sont très fréquents, mais le sous-type 4 est rare. Il concerne quelques NEA extérieurs d'origine cométaire et à orbite instable. Ces objets viennent d'être capturés récemment à partir d'orbites plus grandes, et leur orbite actuelle, très provisoire, est appelée à évoluer encore sensiblement durant les millénaires à venir. On pense, en général, que leur période se réduira et qu'ils deviendront donc des astéroïdes de l'anneau principal. Dans quelques rares cas, ils pourront être carrément expulsés du Système solaire, ou être réinjectés dans un réservoir de comète (nuage de Oort ou ceinture de Kuiper).

La composition physique des NEA

Depuis le début des années 1970, les astronomes ont obtenu un résultat fondamental : l'existence de plusieurs types physiques d'astéroïdes (22), que l'on peut associer avec certains types de météorites bien connues. Ce résultat est dès plus logique dans la mesure où l'on sait qu'il y a continuité entre les deux espèces. On a recensé une quinzaine de types physiques différents (23).

Les types S (objets silicatés) et C (carbonés) sont les principaux, mais on trouve des NEA dans certains autres, notamment M (métalliques) et V (objets originaires de Vesta). Les NEA cométaires sont surtout de type C ou D, mais il semble que certains soient de type S, car ils pourraient être recouverts d'une fine couche silicatée. On voit que les choses sont loin d'être simples et les surprises à venir nombreuses. On se pose aussi la question de savoir si certains NEA d'origine cométaire, récemment injectés dans le Système solaire intérieur, pourraient être totalement composés de glace.

Une origine multiple pour les NEA

A la lumière de tous les travaux entrepris depuis le début des années 1970, on sait d'une manière certaine qu'une double solution s'impose pour l'origine des NEA : une origine *planétaire* et une origine *cométaire*. En fait, à ces deux origines bien distinctes, on en ajoute une troisième qui cohabite avec les deux autres : les *objets mixtes*, qui sont à la fois planétaires et cométaires.

On a longtemps pensé que les NEA planétaires existaient dans une proportion de 3 sur 4 (soit 75 %), pour 1 sur 4 (soit 25 %) cométaire (24). Aujourd'hui, ce rapport est considéré comme trop fort. Les spécialistes, dans leur majorité, penchent plutôt pour un rapport 60/40, le nombre des objets d'origine cométaire ayant été probablement sérieusement sous-estimé.

Mais si l'origine est double, on connaît plusieurs systèmes de renouvellement qui permettent au mécanisme de s'auto-entretenir et à l'impactisme planétaire de perdurer depuis quatre milliards d'années et pour longtemps encore. Je vais dire quelques mots de ces différents mécanismes.

NEA éclats d'astéroïdes

Certaines collisions importantes ou rasantes ne débouchent pas sur une fragmentation totale de l'astéroïde cible (le plus massif des deux), mais elles entraînent l'éjection de matière choquée de la surface dans l'espace. Suite à de tels impacts, des *éclats* d'astéroïdes deviennent des objets *autonomes*, propulsés dans le Système solaire sur des orbites assez différentes parfois de leur corps parent. Ainsi certains NEA recensés ont été dans un passé relativement récent partie intégrante d'astéroïdes plus gros.

On a un exemple excellent avec Vesta, le troisième astéroïde en importance (diamètre 500 km), le seul astéroïde différencié de type V (V pour Vesta justement) et corps parent des *eucrites* de nos collections de météorites. Sa surface est formée d'un assortiment complexe de roches ignées. On connaît plusieurs NEA avec des caractéristiques physiques identiques qui sont de tels éclats pouvant atteindre un diamètre kilométrique, mais qui sont en général de taille hectométrique. Evidemment, il existe aussi d'innombrables fragments plus petits de taille décimétrique ou métrique, mais ceux-ci restent indécélables par nos moyens actuels, sauf s'ils s'approchent très fortement de la Terre.

On connaît deux objets : Golevka et 1996 JA1 qui viennent frôler la Terre, alors que leur ancien corps parent reste sur une orbite ($a = 2,362$ UA, $e = 0,09$ et $i = 7^\circ$) peu excentrique, toujours comprise entre Mars et Jupiter. Que s'est-il passé pour que ces deux NEA aient eu leur orbite tellement modifiée ? On opte pour le scénario (très vraisemblable) suivant (25) : après leur éjection de Vesta (peut-être à partir du très grand cratère qui occupe tout le pôle sud), Golevka et 1996 JA1 ont vu leur demi-grand axe (et leur période) augmenter et ils se sont retrouvés prisonniers de la lacune 1/3 dans laquelle la période moyenne est égale au tiers de celle de Jupiter.

Pour tous les objets capturés dans cette lacune, c'est le "début de la fin". Leur orbite devient chaotique, du fait d'un phénomène de résonance, l'excentricité augmente sérieusement et les approches à Mars, puis à la Terre deviennent possibles, puis effectives. C'est la phase actuelle pour les deux NEA, qui ne sont rien d'autre que des eucrites géantes, capables à leur tour de heurter une planète ou de se fragmenter en une multitude de corps plus petits. Ainsi les eucrites ont une source qui n'est pas près de se tarir, et une multitude d'entre elles, filles et petites-filles d'un corps parent unique, Vesta, sillonnent le Système solaire intérieur pour leur propre compte sur des orbites qui souvent n'ont plus rien de commun.

NEA fragments d'astéroïdes brisés

Nous avons vu avec Vesta que des éclats peuvent acquérir leur autonomie et devenir eux-mêmes des astéroïdes et plus tard, éventuellement, des NEA. Mais il y a un deuxième scénario catastrophe. La collision peut être telle que l'astéroïde cible est totalement brisé. Des dizaines de milliers de fragments remplacent la planète mère désintégrée. Certains vont rester groupés et former une famille d'astéroïdes, qui peut comprendre plusieurs centaines de membres de taille kilométrique et des milliers de taille hectométrique.

On connaît depuis longtemps de telles *familles* (26). Dès 1918, Kiyotsugu Hirayama (1874-1943) avait mis en évidence les cinq principales, déjà bien identifiables à son époque : Flora, Maria, Koronis, Eos et Themis. Chacune de ces familles comporte un nombre variable de membres dont les éléments caractéristiques, au nombre de trois (ce sont le demi-grand axe, l'excentricité et l'inclinaison propre), restent à l'intérieur d'une fourchette assez étroite. Mais au moment de la désintégration du corps parent, de nombreux fragments prennent leur autonomie et deviennent totalement indépendants, et très rapidement il devient impossible de les rapprocher des autres membres de la famille.

Bien entendu, on sait que la majorité des NEA sont de tels objets, fragments de corps plus gros brisés et même souvent rebrisés à plusieurs reprises, de sorte que la diversité apparente des éléments orbitaux ne permet pas dans la plupart des cas de les rapprocher d'objets frères. Seule une étude physique permet de faire parfois le rapprochement. En effet, les fragments d'un même corps parent ont parfois exactement la même composition, le même albédo et un spectre quasi identique. Ainsi on sait que nos météorites sont souvent issues de quelques corps parents à la composition bien particulière.

Astéroïdes cométaires et comètes en sommeil

On connaît plusieurs familles d'astéroïdes, issues de la fragmentation complète d'un *corps parent*, à la suite de collisions importantes. Jusqu'en 1996, tous les spécialistes étaient persuadés que ces familles étaient composées d'objets d'origine et de nature planétaire, c'est-à-dire ce qu'on appelle des vrais astéroïdes.

C'est la découverte de la comète périodique P/Elst-Pizarro en 1996 qui a jeté le trouble et le doute. Tout de suite, les spécialistes du calcul des orbites ont compris que la nouvelle comète faisait partie de la famille Themis, une grande famille d'astéroïdes. C'est la première fois que l'on se trouvait en présence d'une telle anomalie. D'autant plus que P/Elst-Pizarro a été retrouvée sur des plaques photographiques prises en 1939 (27) sur lesquelles elle apparaît sous un aspect totalement astéroïdal. De nouvelles observations en 1997 ont montré à nouveau un corps astéroïdal sans aucune activité cométaire.

Que s'est-il passé en 1996 ? Les spécialistes pensent que cet objet a subi une collision dans l'espace et que la couche superficielle opaque qui le recouvrait a été brisée, libérant une activité cométaire (celle qui fut photographiée) provisoire. Ainsi, cet objet était une *comète en sommeil*, comme on sait qu'il en existe quand tous les éléments volatils qui la composent ne sont pas épuisés, mais seulement prisonniers sous une couche protectrice trop épaisse pour être brisée en temps normal. Une *comète morte*, elle, a épuisé définitivement ses éléments volatils et ne peut donc, en aucun cas, être sujette à un sursaut.

Autrement importante est la conséquence qu'il est obligatoire de tirer de l'existence de P/Elst-Pizarro : le corps parent, le proto-Themis n'était pas un astéroïde, mais une comète ou un objet mixte, astéroïde-comète venu de la ceinture de Kuiper. Cette comète aurait été capturée dans l'anneau des astéroïdes, où elle se serait trouvée une place permanente sur une orbite très stable. Seulement après cette installation, une collision importante l'aurait brisée, permettant par là même la création de la très nombreuse famille Themis. Dans un premier temps, une grande partie des fragments aurait donc eu une activité cométaire, jusqu'à ce que les éléments volatils se soient dispersés dans l'espace, ou soient recouverts d'une couche protectrice, celle-là même qui vient seulement d'être brisée très récemment (au début des années 1990) sur P/Elst-Pizarro.

Mais s'il s'agissait d'un objet mixte, plutôt qu'une vraie comète, il faut bien comprendre que de nombreux fragments étaient planétaires dès l'origine et n'ont jamais eu d'activité cométaire. Seuls certains résidus avaient une composition telle (principalement à base de glace et de gaz gelés) qu'elle fut capable d'engendrer une activité cométaire d'assez courte durée, compte tenu du diamètre restreint de la majorité des fragments.

Cette découverte très importante confirme donc que certains astéroïdes sont des résidus dégazés d'anciennes comètes, et aussi que certaines familles d'astéroïdes sont issues de la fragmentation de comètes formées et venues d'ailleurs et non d'astéroïdes primaires formés sur place.

C'est la preuve aussi que des NEA peuvent être des comètes qui restent longtemps en sommeil et qui, grâce à un événement extérieur fortuit (souvent un petit impact qui transperce la couche externe protectrice), redeviennent provisoirement cométaires, le temps du dégazage redevenu

possible, mais presque obligatoirement dégazage résiduel, donc de très courte durée. On en a eu un autre exemple avec l'objet Wilson-Harrington (28), découvert en tant que comète périodique à très courte période en 1947, et redécouvert comme astéroïde en 1979, quand le dégazage de la petite partie de la comète exposée au Soleil fut terminé.

Un émiettement quasi permanent

Un autre phénomène important à prendre en considération quand on étudie l'origine des NEA est *l'émiettement*. Tout redevient poussière, dans l'espace comme ailleurs. Aussi bien les astéroïdes cométaires que les vrais astéroïdes se fragmentent et s'émiettent.

On connaît plusieurs couples de NEA aux orbites caractéristiques très semblables qui ne se sont séparés que très récemment (quelques milliers d'années seulement dans certains cas), sans heurt majeur puisque les éléments orbitaux sont restés les mêmes. Seule l'orientation dans l'espace varie, la dispersion naturelle se faisant au rythme de quatre degrés par millénaire pour la longitude du nœud ascendant et pour l'argument et la longitude du périhélie.

Parmi les cas les plus frappants, on peut citer Icarus et Talos, deux astéroïdes cométaires de taille équivalente, Adonis et 1995 CS également d'origine cométaire mais de taille différente (1995 CS est un petit fragment d'Adonis qui est devenu autonome), mais aussi Geographos et 1992 SK, deux vrais astéroïdes récemment séparés (29), probablement à la suite d'un choc dans l'espace.

Les boules de glace cosmiques

L'émiettement progressif des astéroïdes, et surtout ceux d'origine cométaire qui sont de nature plus fragile, laissent livrés à eux-mêmes une quasi-infinité de petits corps minuscules, de quelques mètres ou même de quelques dizaines de centimètres seulement, qui deviennent des objets autonomes et que l'on regroupe globalement sous le nom générique de *météoroïdes*. Les noyaux cométaires, notamment, après émiettement laissent la place à des milliers, et même parfois à des millions, de boules de glace dont la vie est éphémère mais dont le renouvellement est permanent. Aucun de ces fragments ne présente plus d'activité cométaire décelable.

En 1986, l'astronome américain Louis Frank (30) émit la curieuse hypothèse que la Terre était constamment bombardée par de telles boules de glace cosmiques, dont le diamètre pourrait atteindre parfois quelques dizaines de mètres de diamètre. Compte tenu de leur composition fragile, ces boules de glace se désintègreraient dès leur entrée dans l'atmosphère terrestre, du fait de leur réchauffement rapide dû au freinage subi dans les couches externes de l'atmosphère terrestre.

Selon Frank, la Terre est bombardée depuis toujours par de gros morceaux de glace d'origine cométaire qui auraient contribué à la création des océans primordiaux. Pour justifier son hypothèse, il se base sur d'innombrables traces qui figurent sur certains clichés pris par des satellites d'observation américains, notamment par le satellite *Dynamics Explorer* en 1986. Mais les autres astronomes ne voulurent pas le suivre dans cette voie, considérant les traces observées comme des *artefacts* d'origine instrumentale, phénomène assez courant quand la résolution est limitée.

En 1996, avec la mission du satellite *Polar*, spécialisé dans l'étude des aurores boréales, Frank réobserva les mêmes traces anormales et renouvela son hypothèse : pour lui, les photos étaient traversées par des traces correspondant au spectre d'émission de molécules d'eau. De fait, des mesures effectuées dans la haute atmosphère terrestre depuis les navettes américaines montraient un niveau plus élevé que prévu de composés à base d'hydrogène, signant par là même la possible présence d'eau.

Il semble que Frank ait du mal à convaincre les autres spécialistes, non de l'existence de glaçons cométaires dans l'espace proche de la Terre, mais de leur nombre, puisqu'il table sur une vingtaine de collisions par minute pour des objets de taille décamétrique, ce qui paraît quand même beaucoup, même si de tels objets restent inobservables de la surface terrestre, car inexorablement voués à une désintégration certaine et très rapide dès le début du réchauffement atmosphérique.

L'impact de glaçons de taille décamétrique sur la Terre est probable, mais rien ne prouve la fréquence astronomique proposée par Frank. Une fréquence hebdomadaire ou mensuelle paraît plus vraisemblable, mais il faudra attendre pour avoir une réponse précise sur ce sujet.

Deux grands groupes : les NEA planétaires et les NEA cométaires

Pour résumer ce problème très important de l'origine des NEA, on peut dire qu'ils se divisent en deux grands groupes : *les NEA planétaires* et *les NEA cométaires*.

Les NEA planétaires sont considérés comme des objets issus de la fragmentation, relativement récente (car pratiquement aucun NEA n'a une espérance de vie supérieure à 100 millions d'années contre 4,6 milliards d'années au Système solaire) d'astéroïdes de l'anneau principal (2,07-3,58 UA) qui, à l'origine ne venaient pas à l'intérieur de l'orbite de Mars.

Les NEA cométaires sont considérés comme des noyaux de comètes ayant perdu tous leurs éléments volatils. Dans certains cas, il peut s'agir de comètes *en sommeil*, pour lesquelles le noyau est provisoirement inactif car entouré d'une "carapace" de poussière ou de substance opaque qui empêche toute activité de type cométaire. On sait que l'espérance de vie *active* des comètes à très courte période (moins de 12 ans) est extrêmement courte à

l'échelle astronomique. Elle se chiffre en dizaines de milliers d'années pour des noyaux de taille kilométrique et en milliers d'années seulement pour ceux de taille hectométrique. Les noyaux de comètes survivent donc ensuite avec un aspect astéroïdal pendant plusieurs millions d'années, si le noyau est suffisamment résistant pour éviter la fragmentation ou l'émiettement à l'occasion d'approches serrées aux planètes.

On dispose aujourd'hui de quelques éléments d'appréciation pour distinguer les deux populations qui cohabitent aussi bien dans les trois types de NEA : Aten, Apollo et Amor. On pense notamment que les types physiques S, M et V concernent les vrais astéroïdes et les types C et D les noyaux cométaires. Mais on se base également sur les éléments orbitaux, une très forte excentricité et une très forte inclinaison étant un indice d'origine cométaire. On pense que la grande majorité des nombreux NEA présentant de fortes variations dans leur courbe de lumière sont des vestiges d'objets *brisés* lors de collisions. A tort ou à raison, les astronomes croient encore (malgré P/Halley) que les noyaux cométaires sont à peu près sphériques en règle générale (ce qui entraîne des exceptions) et qu'ils ne présentent que de minimales variations d'éclat.

Le nombre important de comètes actives à très courte période observées oblige à admettre un nombre de NEA cométaires très élevé, 100 000 de plus de 100 mètres de diamètre moyen d'après les chiffres retenus actuellement (250 000 NEA et 40 % d'origine cométaire). Cependant, il faut signaler que l'on ignore encore la proportion exacte de comètes ayant un vrai noyau solide (31), capables de survivre sous forme d'astéroïdes en évitant la *sublimation* totale de leurs matériaux (glace et gaz gelés notamment), ainsi que la *fragmentation*, phénomène assez courant pour les comètes.

Ce problème de la double origine pour les NEA est très important. Nous verrons que, du fait d'une composition et d'une densité différentes, les conséquences ne sont pas les mêmes quand la Terre entre en collision avec un vrai astéroïde ou un noyau de comète.

Les diamètres et les masses des NEA

Les NEA sont de très petits objets comparativement aux grosses planètes et même aux astéroïdes principaux qui ont plus de 100 km de diamètre. Les diamètres moyens approximatifs des astéroïdes peuvent être calculés à partir de leur magnitude absolue H. Moyens car les astéroïdes en général, et les NEA en particulier, peuvent avoir n'importe quelle forme. Tous les astéroïdes d'origine planétaire sont des objets brisés et donc des fragments informes, et ceux d'origine cométaire sont des noyaux de comètes dégazées qui ne sont pas forcément sphériques, même si en général ils présentent une courbe de lumière moins irrégulière que les vrais astéroïdes.

Cette magnitude absolue H est l'éclat qu'aurait un astéroïde situé à 1,00 UA (150 MK) de la Terre et du Soleil, avec un angle de phase nul. C'est un

paramètre important à partir duquel on calcule toutes les autres magnitudes et les diamètres, et que les spécialistes essaient de déterminer avec précision (au 1/100 de magnitude quand cela est possible) (32).

Parmi les NEA connus, trois seulement dépassent 15 km de diamètre moyen. Il s'agit de Ganymed, le plus gros, qui a autour de 40 km, d'Eros qui a 23 km de diamètre moyen (avec un grand axe de 33 km) et de Don Quixote, un astéroïde cométaire de 20 km environ. Tous les trois sont du type Amor et ne présentent pas de danger pour la Terre pour la période actuelle. Quelques autres objets des types Apollo et Amor ont entre 5 et 10 km. On découvre encore actuellement des NEA avec des diamètres de 3 km et plus.

Le nombre total probable de NEA

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le nombre de NEA, et chaque spécialiste a la sienne. Si les résultats peuvent varier dans le détail, une constante ressort inévitablement : leur nombre total est très élevé, et les objets sont d'autant plus nombreux qu'ils sont petits.

On peut calculer approximativement le nombre de NEA comme un sous-produit de la distribution des magnitudes absolues (33). On sait depuis longtemps que l'on photographie, et donc qu'il existe, trois fois plus d'astéroïdes chaque fois que l'on augmente d'une magnitude. Cette méthode donne de bons résultats pour les magnitudes brillantes pour lesquelles la grande majorité des objets sont déjà découverts.

En 1982, dans la première version de *La Terre bombardée*, je donnais le nombre de 60 000 pour les NEA de plus de 100 mètres de diamètre moyen et celui de 30 000 (50 % du total) pour les EGA. Ces chiffres correspondaient aux connaissances de l'époque. Il s'est avéré que le nombre de NEA a été très longtemps sous-estimé. L'introduction de méthodes modernes de détection a chamboulé l'ancienne vision et a logiquement débouché sur une nouvelle estimation, revue nettement à la hausse, du nombre de NEA et d'EGA qui, grosso modo représentent toujours 50 % comme auparavant.

Les chiffres à retenir sont les suivants :

Objets de 5 km	→	NEA = 20	EGA = 10
Objets de 1 km	→	NEA = 1500	EGA = 750
Objets de 500 m	→	NEA = 20 000	EGA = 10 000
Objets de 100 m	→	NEA = 250 000	EGA = 125 000
Objets de 50 m	→	NEA = 20 000 000	EGA = 10 000 000

Ainsi, on voit que pour les objets de 100 mètres, les anciennes estimations ont été multipliées par 4,2, ce qui d'ailleurs n'est pas énorme. Pour les objets les plus brillants, il n'y a que très peu de changements. C'est au niveau des objets minuscules que la progression est spectaculaire. En fait, pour les NEA d'une dizaine de mètres, leur nombre se chiffre en milliards et pour les autres astéroïdes des différentes parties de l'anneau principal, il est

quasiment illimité. Heureusement que l'atmosphère terrestre est là pour nous protéger de cette mitraille cosmique.

Le XXI^e siècle va voir la découverte de dizaines de milliers de NEA de plus de 100 mètres et devrait permettre de repérer la quasi-totalité de ceux dont le diamètre avoisine le kilomètre. Par contre, bien que certains spécialistes semblent y croire, il paraît utopique d'envisager un recensement quasi complet pour tous les NEA de 500 mètres. Certains resteront inconnus pour des siècles encore, et il faut savoir aussi que le renouvellement est constant. Il y aura donc toujours des "nouveaux".

Les approches possibles des NEA à la Terre

On entend par *approche possible*, la distance *entre les orbites* de la Terre et celle de l'astéroïde ou de la comète. A l'échelle astronomique, cette distance minimale (constamment variable avec le temps) peut être atteinte assez souvent, ou tout au moins approchée de près.

Il faut bien savoir que certains NEA s'approchent fortement de la Terre (ce sont alors également des EGA), d'autres pas, même parmi les objets Aten et Apollo qui croisent l'orbite terrestre. Cette distance entre les orbites évolue sans cesse selon l'orientation des orbites dans l'espace.

Les différents types d'approches

On distingue quatre sortes d'approches possibles différentes :

- les *TFAP* (T), Très Fortes Approches Possibles, inférieures à 0,050 UA ;
- les *FAP* (F), Fortes Approches Possibles, comprises entre 0,050 et 0,100 UA ;
- les *AMP* (M), Approches Moyennes Possibles, comprises entre 0,100 et 0,200 UA ;
- les *FAP* (P), Pas d'Approches Possibles inférieures à 0,200 UA.

Les objets ayant une TFAP ou une FAP à la Terre sont des EGA au sens strict ; ceux qui ont une TFAP et $H < 22,1$ sont également des PHA, des objets potentiellement pour la Terre, ce qui est d'ailleurs très exagéré. Ils sont uniquement dangereux pour les civilisations. Les autres objets sont uniquement des NEA pour la période actuelle. Mais de nombreux objets peuvent passer d'un statut à l'autre, au fur et à mesure de l'évolution des différents éléments orbitaux.

Analyse des approches possibles

L'époque où des objets comme Apollo ($D_m = 0,025$ UA) et même Adonis ($D_m = 0,013$ UA) figuraient encore dans les dix premiers est bien loin. Fin 2011, la 1000^e approche d'un NEA est de 0,007 UA et la 2000^e de 0,019 UA. Pour les PHA, la 100^e approche possible vaut 0.003 UA. Aujourd'hui, pour entrer

dans le "top 10", un EGA doit être sur une orbite de quasi-collision (34) ($D_m < 0,0010$ UA, soit 150 000 km, ou 1/1000 d'unité astronomique, c'est-à-dire une distance insignifiante à l'échelle astronomique).

Certains objets de taille kilométrique, comme 1994 PC1 et Oljato ou d'autres comme Midas, Toutatis et Phaethon (lié à l'important essaim météoritique des *Géminides*), s'annoncent très dangereux pour la Terre à moyen terme (quelques milliers d'années) et devront peut-être être détruits pour éviter une catastrophe dont la civilisation actuelle ne se remettrait que difficilement.

Je signale encore deux objets remarquables qui sont de temps à autre sur une authentique orbite de collision. 1994 GV, un objet d'une dizaine de mètres, n'est pas très dangereux (sauf éventuellement au niveau local) du fait de sa petite taille. Par contre, 1993 VB a un diamètre de 400 mètres et pourrait s'avérer très menaçant au cours des siècles prochains. Lui aussi devra peut-être être détruit pour éviter une catastrophe qui, si elle ne serait pas globale, pourrait être néanmoins très sérieuse.

Les très fortes approches réelles des EGA

De très nombreux EGA connus ont eu des très fortes approches réelles à la Terre (des TFAR, inférieures à 0,050 UA, soit $< 7,5$ MK) depuis le début du XX^e siècle. Il est quasiment impossible de faire un bilan complet pour tous les objets connus, car on manque trop d'informations sur les orbites passées d'objets qui, pour la plupart, ont été découverts dans les récentes années, et qui surtout, souvent, n'ont pu être observés que quelques jours à l'occasion de leur très forte approche.

Analyse des approches réelles

La liste des approches réelles connues du Minor Planet Center est devenue pléthorique et le record a été battu à plusieurs reprises. Ainsi l'approche historique de Hermes du 30 octobre 1937 ($0,0049$ UA = $0,73$ MK), qui a été le record absolu durant plus d'un demi-siècle, ne figure plus parmi les vingt approches les plus serrées. D'abord battu par Asclepius en mars 1989 ($0,0046$ UA = $0,69$ MK), le record a été pulvérisé par 1991 BA, un EGA de moins de 10 mètres de diamètre, en janvier 1991 ($0,0011$ UA = $0,165$ MK). Deux autres objets de même calibre l'ont amélioré les années suivantes : 1993 KA₂ en mai 1993 ($0,0010$ UA = $0,150$ MK) et 1994 XM₁ en décembre 1994 ($0,0007$ UA = $0,105$ MK). Depuis, ce record a encore été amélioré à deux reprises, d'abord par 2003 SQ222 en septembre 2003 ($0,00056$ UA = $0,084$ MK) et enfin par 2004 FU162 en mars 2004 ($0,00009$ UA = $0,013$ MK).

Jusqu'à l'impact annoncé de 2008 TC3 le 7 octobre 2008, objet de quelques mètres découvert seulement la veille (le 6 octobre) qui s'est désintégré dans l'atmosphère au-dessus du nord du Soudan sans causer aucun dommage. Mais il faut insister sur le fait que ces approches-record récentes ont concerné des objets insignifiants, de quelques mètres de diamètre seulement.

Il faut savoir que le 10 août 1972, le fameux *météore du Montana* a frôlé la surface terrestre à 58 km d'altitude, ricochant dans l'atmosphère terrestre avant de repartir dans l'espace. Il s'agissait d'un NEA d'une quinzaine de mètres qui n'a pas reçu de désignation provisoire, car il n'a été observé que durant quelques dizaines de secondes. Ce record ne sera jamais battu, car il constitue pratiquement l'approche minimale possible. Une approche inférieure à 50 km déboucherait obligatoirement sur une désintégration ou un impact.

L'approche de 1994 PC1 en janvier 1933 : 0,0075 UA, soit 1,12 MK, est la plus forte approche connue d'un EGA d'un diamètre supérieur au kilomètre au XX^e siècle. Il ne fut pas découvert pour autant, bien qu'il ait été un objet facile à l'époque (cette approche a donc été calculée rétroactivement). Cela montre bien que des objets très dangereux ont longtemps échappé aux observateurs les plus qualifiés. Delporte et Reinmuth, les deux ténors de cette période, et tous leurs confrères, ont également raté Toutatis l'année suivante, ne pouvant pas le distinguer de la masse des objets anonymes qui ont laissé leur empreinte sur des plaques photographiques.

Les six fortes approches de Toutatis entre 1992 et 2012

Toutatis est l'un des EGA favoris des spécialistes. A juste titre. C'est un objet particulièrement intéressant qui fut découvert en janvier 1989 à Caussols par Christian Pollas sur un cliché pris par Alain Maury. Retrouvé sur une plaque prise en Belgique en 1934, Toutatis a pu être très rapidement numéroté et son orbite est aujourd'hui parfaitement connue.

Il a la particularité d'avoir une période de révolution qui est en résonance avec celle de Jupiter : il fait trois tours autour du Soleil quand la planète géante en fait une. C'est donc un astéroïde lacunaire circulant sur une orbite chaotique, avec $a = 2,53$ UA et $P = 4,01$ ans pour la période actuelle. Il en résulte que les approches serrées à la Terre se font épisodiquement par séries. Après une longue période sans forte approche, Toutatis en a six consécutives à quatre années d'intervalle durant la période 1992-2012. L'astronome belge Edwin Goffin a calculé les approches suivantes : 3,61 MK le 8 décembre 1992, 5,30 MK le 29 novembre 1996, 11,05 MK le 31 octobre 2000, 1,55 MK (0,0104 UA) le 29 septembre 2004, 7,52 MK le 9 novembre 2008 et enfin 6,93 MK le 10 décembre 2012.

Une chose est sûre : cet EGA sera particulièrement dangereux dans l'avenir, d'autant plus que ses dimensions, même si elles sont inférieures à ce que l'on croyait jusqu'en 1992, restent appréciables : 4,6 km dans la longueur, 2,4 km et 1,9 km pour les deux autres (il s'agit donc d'un corps oblong). En fait, on sait aujourd'hui que Toutatis est un objet binaire, formé de deux anciens petits astéroïdes qui se sont "collés" l'un à l'autre (35). Les clichés pris en 1992 ont permis d'obtenir une première cartographie préliminaire de ce petit voisin qu'il faudra surveiller de très près.

Apophis, l'astéroïde qui fait peur

Cet astéroïde, découvert en juin 2004 et connu dans un premier temps sous l'appellation provisoire 2004 MN4, s'est avéré d'un intérêt extraordinaire (36). C'est lui qui a l'approche calculée la plus faible pour tout le XXI^e siècle pour tous les NEA connus de plus de 50 mètres. Le 13 avril 2029, à 21h43' (temps universel), il s'approchera à 0,00023 UA, soit à 33 600 km du centre de la Terre, c'est-à-dire à moins de 28 000 km de sa surface, record absolu pour un PHA. Il sera alors visible à l'oeil nu, comme une petite étoile de magnitude 3 ou 4. Son diamètre est de l'ordre de 400 mètres (H = 19,2). Des mesures radar donnent un diamètre un peu inférieur : 270 mètres (avec H = 19,7). Il faudra attendre pour trancher. En fait, Apophis pourrait être un objet allongé comme Eros ou Geographos.

Apophis, qui était le dieu du mal et de la destruction dans la mythologie égyptienne (sous le nom égyptien d'Apep), est un NEA (et aussi un EGA et un PHA) de type Aten ($a = 0,922$ UA). Après son approche rasante à la Terre, il va devenir, sous les yeux des astronomes, un NEA de type Apollo (avec $a = 1,125$ UA). Cet objet est le meilleur exemple de la façon dont un NEA peut passer d'un type à l'autre à la suite d'une très forte approche à une planète. Il est aussi une révélation, dans la mesure où aucun astéroïde connu de plus de 100 mètres ne s'était approché aussi près de la Terre.

Les calculs ont montré que Apophis eu 4 TFAP à la Terre (entre 0,024 et 0,032 UA) au XX^e siècle, sans être découvert pour autant, et qu'il en aura encore 4 autres au XXI^e siècle. C'est l'astéroïde qui fait peur, quasiment "un ennemi extérieur". Certains pensent que les très importantes perturbations qu'il va subir en avril 2029 pourrait le précipiter sur la Terre, lors de son approche suivante en 2036, ce qui est très peu probable, ou qu'il pourrait même se désintégrer s'il est de constitution cométaire. On ignore encore tout de son origine et de sa configuration structurale. A l'échelle astronomique, il est clair que ses jours sont comptés et que la Terre risque d'en faire les frais au cours des siècles prochains, si rien n'est fait pas nos successeurs pour le détourner ou le détruire.

L'espérance de vie des NEA

La fréquence de l'impactisme terrestre est principalement liée à l'espérance de vie des NEA. Celle-ci est courte à l'échelle astronomique, très inférieure à l'âge présumé du Système solaire. Cela est fort logique, quand on sait que les astéroïdes sont des astres brisés, souvent à plusieurs reprises. L'espérance de vie moyenne des objets pénétrant à l'intérieur de l'orbite de Mars, les *Mars-crossers*, est estimée en gros à 100 MA, avec des extrêmes pouvant aller de 1 MA à 1000 MA environ. Un Mars-crosser a donc une espérance de vie moyenne 50 fois inférieure à celle du Système solaire à son stade actuel d'évolution.

Les objets des types Apollo et Aten, les *Earth-crossers*, ont une espérance de vie encore dix fois plus courte que les *Mars-crossers* et plusieurs astronomes

qui ont fait des simulations sur le sujet leur octroient seulement 10 MA en moyenne en tant qu'astres indépendants.

Ces âges, qui ne sont que des ordres de grandeur, ont été obtenus par comparaison avec ceux des météorites. On peut calculer avec une bonne approximation la durée d'exposition de ces objets aux rayons cosmiques, durée qui correspond à leur âge en tant qu'objets autonomes dans l'espace depuis la dernière fragmentation dont ils sont issus. Pour les chondrites ordinaires (types H, L et LL) qui représentent la majorité des NEA, la fourchette des âges probables va de moins de 1 MA à 50 MA. Il semble que l'espérance de vie des sidérites, qui sont beaucoup moins sujettes à la fragmentation, du fait d'une résistance largement supérieure, soit sensiblement plus élevée, dans de nombreux cas supérieure à 100 MA.

Ces âges sont cohérents avec ce que l'on sait de l'évolution des orbites à très long terme. Pratiquement, aucun NEA ne peut exister plus de 100 MA, sans subir une collision avec l'une des quatre planètes intérieures, la Lune ou l'un des millions d'astéroïdes de l'anneau principal.

Fréquence d'élimination individuelle

Environ 1 NEA sur 2 croise l'orbite terrestre, soit environ 125 000 objets de plus de 100 mètres de diamètre moyen. La combinaison des chiffres concernant le nombre total de NEA et ceux de leur espérance de vie moyenne permet d'obtenir la fréquence d'élimination individuelle d'un NEA, selon son type orbital, sa magnitude absolue et son diamètre.

Pour la version 1998 de ce livre, j'avais recalculé tous les chiffres concernant les fréquences d'élimination et d'impact sur les différentes planètes. Les chiffres de 1982 étaient basés sur un nombre d'objets recensés à l'époque qui n'atteignait pas la centaine, alors que ceux de 1998 étaient basés sur plus de 700 NEA recensés (37).

La fréquence d'élimination individuelle des NEA a été calculée, étant entendu que leur espérance de vie reste la même en moyenne : 10 MA, c'est-à-dire peu de temps à l'échelle astronomique (on table actuellement pour 1/40 ou 1/50 de l'âge du Système solaire). La part attribuée à chaque planète est obligatoirement assez aléatoire et varie selon la méthode et les chiffres utilisés, mais certaines constantes émergent. Les quatre planètes intérieures récupèrent globalement 50 % du total (Mars 15 % (38), la Terre 20 %, Vénus 10 % et Mercure 5 %). Les 50 % restants se répartissent de la façon suivante : Soleil 15 %, astéroïdes, Lune et satellites 5 %, désintégration et émiettement 20 %, expulsion sur une orbite extérieure 10 %.

Ces chiffres ne sont évidemment que des ordres de grandeur. L'exemple de la comète d'Aristote (génitrice du *groupe de Kreutz*, voir chapitre 7) laisse à penser à certains spécialistes que la part du Soleil pourrait être nettement plus importante que 15 %. Certaines simulations semblent montrer que la combinaison : attraction du Soleil + orbite chaotique conduirait pour

certaines astéroïdes et comètes lacunaires à une collision directe avec le Soleil (q devenant très proche de 0,001 UA), ou à une désintégration dans la proche banlieue solaire avec comme conséquence la formation d'une poussière cosmique constamment renouvelée.

Il est possible que la part du Soleil et celle de l'expulsion aient été sous-estimées, de telle sorte que la Terre ne serait plus destinataire de 20 % des NEA existants des types Aten et Apollo, mais seulement de 10 % (hypothèse basse). Si tel était le cas, la fréquence d'impact serait à diminuer d'un facteur 2, mais l'hypothèse haute paraît quand même plus probable.

Le problème posé par les NEA minuscules

On entend par astéroïdes minuscules, ceux qui ont $H > 22,0$ (valeur correspondant à un diamètre inférieur à 100 ou 200 mètres de diamètre moyen selon le type physique et l'albédo). Il apparaît que ceux-ci doivent être traités différemment des autres. Leur nombre est de 20 millions de NEA et de 10 millions d'EGA de 50 mètres, un nombre embarrassant pour les spécialistes, mais qu'il faut prendre en considération. C'est de la poussière cosmique à l'échelle astronomique. S'il n'existait pas de processus de destruction, chaque décennie verrait un impact dans l'atmosphère terrestre, ce qui (heureusement) est contraire aux observations depuis deux siècles.

En fait, il existe trois mécanismes de destruction qui entrent en jeu : désintégration et émiettement dans l'espace et destruction dans l'atmosphère terrestre, mécanismes qui sont beaucoup plus efficaces pour les petits objets que pour ceux qui sont de taille hectométrique ou kilométrique, notamment du fait qu'il s'agit très souvent de fragments cométaires dont la cohésion structurale est de mauvaise qualité. Une simple approche très serrée à une planète peut déboucher sur une fragmentation sévère, voire sur une désintégration totale. De plus, il s'avère que les objets minuscules sont condamnés à l'émiettement quand ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre, et ils ne franchissent que très rarement la totalité des différentes couches atmosphériques.

Tous les chiffres indiqués dans cette section sont variables avec le temps, la désintégration d'une comète (comme celle d'Aristote, génitrice du groupe de Kreutz) ou d'un centaure (comme Hephæstos) pouvant ponctuellement, pour quelques centaines de milliers d'années, augmenter sérieusement le nombre d'objets dans l'environnement immédiat de la Terre. On peut quasiment parler de pollution astronomique. On le voit encore aujourd'hui avec le *Complexe des Taurides*, vaste courant d'objets minuscules qui circulent sur des orbites similaires, apparentées à un progéniteur commun.

La fréquence d'élimination peut paraître trop forte à certains spécialistes. A mon avis, il n'en est rien. On sait que les NEA se renouvellent sans cesse, notamment la part cométaire, par l'introduction dans le Système solaire proche d'objets en provenance de la ceinture de Kuiper ou du nuage de Oort. Des objets mi-planétaires mi-cométaires souvent, dont la cohésion ne résiste

pas à l'approche d'une des grosses planètes (Jupiter surtout, mais aussi Saturne, Uranus ou Neptune) et qui se fragmentent en une multitude d'objets plus petits. Mais on sait depuis le début des années 1990 que ces anciens membres de la ceinture de Kuiper, qui passent souvent par le type intermédiaire de centaure, peuvent dépasser 100 km dans certains cas, et que leurs fragments peuvent dépasser largement les 10 km. Un diamètre de 3 km ne peut être considéré comme exceptionnel, on l'a vu avec les fragments de Hephastos, dont plusieurs dépassent ce diamètre.

Fréquence des collisions sur la Terre

Les données actuelles laissent à penser qu'environ 1 NEA de type Aten et Apollo sur 5 entrera en collision avec la Terre (en 1982, je donnais 1 objet sur 3, du fait de la sous-estimation de la part revenant au Soleil et à l'expulsion). La combinaison de cette nouvelle information avec celles dont j'ai fait état plus haut concernant la fréquence d'élimination individuelle permet de connaître la fréquence des collisions sur la Terre et sur les parties émergées et immergées de notre globe.

On peut admettre au vu des données actuelles (toujours comme de simples ordres de grandeur), pour des objets *entrant dans l'atmosphère*, que, en moyenne :

- 1 EGA de 100 mètres heurte la Terre tous les 350 ans, les océans tous les 500 ans et les terres émergées tous les 1200 ans ;
- 1 EGA de 300 mètres heurte la Terre tous les 3500 ans, les océans tous les 5000 ans et les terres émergées tous les 12 000 ans ;
- 1 EGA de 500 mètres heurte la Terre tous les 10 000 ans, les océans tous les 15 000 ans et les terres émergées tous les 35 000 ans ;
- 1 EGA de 1 km heurte la Terre tous les 50 000 ans, les océans tous les 70 000 ans et terres émergées tous les 170 000 ans.

Dans les chapitres suivants, je reviendrai sur ces chiffres quand je parlerai des diverses conséquences de l'impactisme terrestre, notamment les conséquences humaines largement sous-estimées. Je précise bien qu'il s'agit d'objets entrant dans l'atmosphère, et non ceux qui touchent effectivement le sol, qui sont beaucoup moins nombreux, dans la mesure où la fragmentation, et même la désintégration, sont chose courante, surtout pour les petits objets. Heureusement, quand on sait le danger que représente un impact océanique, comme nous le verrons en détail au chapitre 13.

L'énergie d'impact des EGA

On connaît le diamètre approximatif des EGA, ainsi que leur densité probable. Il est donc possible de calculer leur énergie cinétique au moment de l'impact, avec la formule classique : $E_c = \frac{1}{2} mv^2$. Cette énergie cinétique

est égale au demi-produit de la masse par le carré de la vitesse d'impact. La vitesse est donc un facteur très important, puisqu'une vitesse double entraîne une énergie cinétique multipliée par 4.

On sait que tous les EGA connus ont des orbites directes et donc que leur vitesse à la distance de la Terre au Soleil ne peut pas être supérieure à 42,1 km/s (vitesse parabolique de la Terre). En fait, leur vitesse à r (rayon vecteur) = 1,00 UA est comprise entre 25 km/s (EGA de type Aten) et 38 km/s (EGA de type Apollo avec $a > 2,50$ UA et $e > 0,70$).

La vitesse géocentrique d'un EGA est une vitesse relative qui résulte de la combinaison de la vitesse propre de l'objet avec celle de la Terre (qui varie entre 29,3 et 30,3 km/s du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre). Cette vitesse géocentrique est la vitesse au moment de l'impact (à peu de choses près, car il faut prendre en compte l'accélération due à l'attraction terrestre). On admet, comme moyenne une vitesse d'impact de 20 km par seconde, ce qui est énorme, mais avec des extrêmes (la fourchette) qui peuvent atteindre 10 et 35 km/s selon la géométrie des orbites.

Il faut encore préciser qu'à partir d'une certaine masse (quelques dizaines de milliers de tonnes, soit une vingtaine de mètres de diamètre), les EGA ne sont pratiquement plus freinés durant leur traversée de l'atmosphère et ils gardent donc une fraction très importante (plus de 90 %) de leur vitesse initiale.

Les EGA ont une énergie cinétique loin d'être négligeable. Cette énergie, pour un objet supposé sphérique (car c'est loin d'être le cas en général), augmente d'un facteur 1000 quand le diamètre augmente d'un facteur 10. Ainsi un EGA de 1 km, de type S, densité 3,5 (aérolithe) avec une vitesse d'impact de 20 km/s, a une énergie cinétique $E_c = 3,7 \times 10^{20}$ joules. Un astre dix fois plus faible (100 mètres) a une énergie cinétique $E_c = 3,7 \times 10^{17}$ joules et un autre dix fois plus gros (10 km) a une énergie cinétique $E_c = 3,7 \times 10^{23}$ joules. Eros, avec un diamètre moyen supposé de 24 km et une densité de 4,0 a une énergie cinétique $E_c = 5,8 \times 10^{24}$ joules, c'est-à-dire largement supérieure à l'énergie totale libérée par tous les grands cataclysmes purement terrestres passés et présents connus.

L'énergie comparée des impacts et des cataclysmes terrestres

Pour bien comprendre ce problème de l'énergie libérée par les impacts d'astéroïdes sur la Terre, il est nécessaire de faire des comparaisons avec les cataclysmes terrestres connus.

La Terre est une planète vivante et violente (39/40), sujette à d'innombrables cataclysmes plus ou moins destructeurs. Il ne se passe pas une année sans que notre planète ait à souffrir d'un séisme important ou d'une éruption volcanique notable. On a essayé de calculer l'énergie libérée par les grandes catastrophes terrestres, mais les calculs ont toujours été difficiles et

approximatifs. Les techniques se sont affinées, cependant, et on possède maintenant quelques données intéressantes permettant de faire des comparaisons utiles.

Les séismes et les éruptions volcaniques

La hiérarchie des très grands séismes du XX^e siècle a été bouleversée par l'introduction d'une nouvelle échelle de magnitudes (magnitudes Mw), en 1977 (41), basée sur le *moment sismique* et qui prend en compte l'énergie libérée par toute la zone de rupture des séismes majeurs. On se doutait depuis longtemps que l'échelle des magnitudes de Richter (Ms) (42), calculées d'après l'étude des ondes sismiques P et S, était saturée pour les grands séismes. Cet effet entraînait une sous-estimation assez importante de l'énergie dégagée. L'échelle Mw peut être utilisée comme une continuation naturelle de l'échelle Ms qui reste valable pour les séismes jusqu'à la magnitude 8,0.

Les volcanologues et les sismologues ont des formules un peu différentes pour calculer l'énergie des cataclysmes qu'ils étudient. La formule que j'utilise pour ce livre (43) est quelque peu différente de celle utilisée en 1982 pour *La Terre bombardée*, aussi les valeurs obtenues ne sont-elles pas exactement les mêmes que celles que je donnais alors. Le lecteur ne doit pas s'en étonner, tous ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur.

L'énergie maximale des séismes que l'on pouvait situer aux alentours de 2×10^{18} joules (Mw = 9,0) doit être considérablement relevée. Le séisme du Chili en 1960, qui est maintenant le plus important connu (ce qui n'était pas le cas avec les classiques magnitudes de Richter) a dégagé une énergie au moins égale à $1,1 \times 10^{19}$ joules (Mw = 9,5). Trois autres séismes du XX^e siècle ont atteint ou dépassé la magnitude Mw = 9,0 : ceux de l'Alaska en 1964 (Mw = 9,2), des îles Aléoutiennes en 1957 (Mw = 9,1) et du Kamchatka en 1952 (Mw = 9,0). Heureusement, seule la catastrophe du Chili a concerné une région à forte densité de population. Le séisme indonésien de décembre 2004 qui a engendré le tsunami catastrophique qui a fait plus de 250 000 victimes en Asie du sud-est était de magnitude 9,0.

Les éruptions volcaniques (44/45) sont les cataclysmes terrestres qui peuvent libérer le plus d'énergie, une énergie assez nettement supérieure à celle des grands tremblements de terre. La plus importante des temps modernes est celle du Tambora, dans l'île indonésienne de Sumbawa, qui éjecta plus de 150 km^3 de produits en 1815. On admet une énergie totale de 10^{20} joules pour cette éruption, dix fois supérieure à celle plus connue du Krakatoa, en 1883. Mais il est certain que plusieurs éruptions géantes de l'ère tertiaire, et même celle de Toba, dans le nord de Sumatra, qui date de 75 000 ans et qui est la principale éruption connue de l'ère quaternaire, ont libéré des énergies sensiblement supérieures à celle du Tambora, pouvant atteindre dans certains cas 10^{22} joules.

Les autres cataclysmes

Parmi les autres cataclysmes terrestres, dont on peut mesurer l'énergie et que l'on peut donc comparer aux impacts d'EGA, il faut encore citer les tsunamis ou raz de marée. Leur énergie varie de 10^{13} à 10^{18} joules et est de l'ordre de 1/10 à 1/100 de celle du cataclysme responsable (séisme sous-marin, glissement ou effondrement du fond océanique, explosion volcanique, impact). Cela veut dire que, bien que la force de destruction d'un tsunami soit importante et qu'un séisme de magnitude 8,5 puisse contribuer à la formation d'une vague de plus de 30 mètres et à des destructions sévères jusqu'à 500 km à l'intérieur des côtes, son énergie reste largement inférieure à celle du cataclysme responsable. Un astéroïde de quelques centaines de mètres au moment de l'impact est donc en mesure de créer un fantastique tsunami, d'une magnitude très supérieure à celle engendrée par les séismes terrestres.

Il y a une autre famille de cataclysmes dont il faut parler car ils engendrent, eux aussi, des énergies colossales et devant lesquels l'homme est impuissant et désarmé, on le voit chaque année. C'est la famille des cyclones avec ses variantes régionales (ouragans, typhons, etc.). Le cyclone tropical est une machine thermodynamique capable de produire une énergie globale voisine de 10^{25} joules dans les cas extrêmes, largement supérieure aux autres cataclysmes terrestres, mais il libère son énergie en quelques jours, alors que celle d'un séisme meurtrier est libérée en quelques minutes. On sait que les spécialistes sont, eux aussi, un peu désarmés lorsqu'il s'agit de mesurer avec précision l'énergie de ces grands cyclones tropicaux.

Enfin, parmi les autres cataclysmes mesurables, mais qui ne sont pas naturels, il faut bien citer les explosions nucléaires qui se sont succédé lors du triste épisode de la guerre froide entre les Américains et les Soviétiques. L'inflation dans l'horreur et dans la puissance des moyens mis en œuvre aurait pu mener à la catastrophe. On sait qu'une mégatonne (= 1000 kilotonnes) de TNT équivaut à une énergie de $4,2 \times 10^{15}$ joules, qui est également celle libérée par un séisme de magnitude 7,1.

On admet, en général que la totalité des explosifs utilisés par les divers belligérants lors de la Seconde Guerre mondiale représentait entre deux et trois mégatonnes de TNT, pas plus, soit largement moins qu'un grand cataclysme terrestre naturel. Si la bombe d'Hiroshima (1945) avait une magnitude assez faible, approximativement 6,4, par contre la plus forte explosion nucléaire cataloguée, celle de 1961 en Nouvelle-Zemble (URSS) avait une magnitude de 8,1. L'énergie libérée, en gros $6,5 \times 10^{16}$ joules, correspond à un impact d'EGA de 50 mètres de diamètre moyen. Tous ces chiffres confirment le danger d'un impact de taille hétéométrique.

Impact = énergie libérée instantanée et "extraterrestre"

On se rend compte avec ces quelques remarques et comparaisons de la fantastique énergie que peut libérer un EGA de 2 ou 3 km quand il heurte la

Terre. Surtout qu'il ne faut pas oublier une chose. C'est que l'énergie libérée par un EGA est pratiquement instantanée (quelques secondes), alors qu'un séisme dure quelques dizaines de secondes, un ouragan quelques jours et une éruption volcanique quelques semaines. Un EGA de type S de 2 km peut provoquer un séisme largement supérieur à tous les cataclysmes terrestres connus avec son énergie cinétique de $2,9 \times 10^{21}$ joules. Un EGA de 3 km de diamètre et de type M, c'est-à-dire un objet métallique comme 1986 DA, fragment de noyau d'astéroïde différencié et qui était sur une véritable orbite de collision avec Mars à la fin du XX^e siècle, a une énergie cinétique de l'ordre de $2,2 \times 10^{22}$ joules. Enfin, un gros EGA de 5 km, comme on en connaît plusieurs, a une énergie de 5×10^{22} joules, ce qui correspond pratiquement à plus de 1000 fois l'énergie dégagée par le séisme du Chili en 1960, qui est le plus important connu. Cela paraît quasiment incroyable, mais les chiffres sont là pour montrer qu'il s'agit bien de la réalité.

Autre conclusion très importante à signaler : l'énergie cinétique d'un EGA de 600 mètres de diamètre moyen n'est pas supérieure à celle des grands cataclysmes terrestres. Tous les impacts d'EGA de cette taille et les plus petits, qui sont de loin les plus nombreux, sont donc des événements très secondaires sur le plan énergétique et leurs conséquences sont médiocres à l'échelle terrestre (je ne parle pas évidemment des conséquences *humaines* et *économiques*).

Les NEA et l'hypothèse Hephaistos

L'hypothèse de la capture, il y a quelques dizaines de milliers d'années, dans le Système solaire intérieur d'une grosse comète (46), proposée par les néo-catastrophistes britanniques, est extrêmement intéressante et probablement fondée. Le nombre d'astéroïdes connus issus de la fragmentation et de l'émiettement ultérieur d'un corps cosmique unique en entrant dans le Système solaire intérieur est en constante augmentation. Et surtout tous ces objets sont assez facilement identifiables, grâce à leur très forte excentricité (dans la fourchette 0,70-0,85 en général) et leur faible inclinaison (entre 0 et 12°), les valeurs du demi-grand axe étant plus dispersées, suite à des perturbations différentes. On en connaît plus de 150 en 2011, ils forment la *famille Hephaistos*. Certains membres de la famille originelle ont été accélérés et ont vu leur période diminuer, quittant ainsi l'anneau principal (sous-type 3) où ils ont subi pour beaucoup une nouvelle fragmentation et une dispersion pour devenir de sous-type 2, avec $a < 2,00$ UA. Ils pourraient faire partie de la famille Heracles qui comprend environ 80 membres connus.

On penche aujourd'hui pour la capture d'un centaure plutôt que d'une comète géante arrivant directement de la ceinture de Kuiper. C'est Hephaistos. On sait que ces centaures sont souvent des objets mixtes, mi-astéroïdes/mi-comètes et que leurs fragments peuvent être de nature différente, ce qui est moins paradoxal qu'il n'y paraît. Certains *ont eu* une activité cométaire, mais pas tous. Le type physique de ces fragments est différent selon leur composition de surface, et c'est bien ce que l'on observe avec les divers fragments recensés. Un des fragments de Hephaistos, qui

n'est pas le plus gros, loin de là, après une longue période de sommeil durant laquelle il a été un NEA cométaire parmi d'autres, s'est réveillé, peut-être à la suite d'un choc dans l'espace. C'est P/Encke, la fameuse comète périodique qui n'est à nouveau active que depuis trois siècles seulement et pour très peu de temps (deux ou trois siècles au maximum).

La découverte par le calcul que P/Encke et Oljato étaient encore, il y a moins de 10 000 ans, un seul et même fragment issu du géniteur Hephaistos a été une découverte essentielle pour comprendre la complexité de notre histoire cosmique. A la fragmentation initiale, il s'est ajouté une fragmentation ultérieure (avec la formation des familles jumelles Hephaistos et Heracles) et un véritable émiettement, du fait de la très faible cohésion de certains fragments et des très fortes approches aux planètes qu'ils ont subies. Mais comme la rupture initiale est quasi contemporaine (à l'échelle astronomique), la désintégration est loin d'être terminée et elle se poursuit encore actuellement quasiment sous les yeux des astronomes.

Je reparlerai plus en détail de l'hypothèse Hephaistos dans le chapitre consacré aux comètes, car P/Encke est le fragment le plus connu et c'est par rapport à cette comète que l'on situe les divers courants météoriques associés, courants déjà dispersés et issus eux-mêmes de l'émiettement d'objets secondaires qui se sont séparés bien après le cataclysme initial qui a donné naissance à des fragments majeurs comme Hephaistos et Heracles. Une partie de ces divers courants et de nombreux astéroïdes sont des composants du *Complexe des Taurides*. L'origine commune ne fait pas de doute, la désintégration du corps parent non plus. La Terre en a obligatoirement subi les conséquences, et c'est l'une des grandes leçons des années 1980, durant lesquelles le phénomène a été mis en évidence par les néo-catastrophistes britanniques.

Il n'empêche qu'aujourd'hui la quasi-totalité des fragments générés par Hephaistos, l'objet original, sont des *astéroïdes*, définitivement dégazés pour ceux qui ont eu une activité cométaire. On est en droit d'attendre la découverte de plusieurs centaines de membres de taille kilométrique et hectométrique, ce qui est énorme et montre bien que l'environnement terrestre est encore pollué de nos jours par des produits de désintégration cométaire. Heureusement que notre atmosphère est un écran de protection très efficace pour tout le matériel fragile d'origine cométaire et qu'elle est en mesure de faire elle-même le plus gros du ménage. Il semble bien que les fragments de glace de taille décamétrique, ainsi que les fragments carbonés (type C) soient condamnés à une désintégration quasi complète. Mais d'autres sont composés de roches (type S et même type E), avec une cohésion structurale nettement meilleure. L'objet de la Toungouska, baptisé aujourd'hui Ogdy (pour le dieu du feu des Toungouzes), serait l'un d'eux (voir le chapitre 9).

Notes

1. J. Lilensten (et 7 autres auteurs), *Le système solaire revisité* (Eyrolles, 2006). Cet ouvrage collectif fait le point sur nos connaissances actuelles sur le Système solaire après son exploration par des sondes spatiales.
2. K.R. Lang et C.A. Whitney, *Vagabonds de l'espace* (Springer-Verlag, 1993 ; traduction de M.-A. Heidmann). Titre original : *Wanderers in space* (1991).
3. A.H. Delsemme (ed.), *Comets Asteroids, Meteorites - Interrelations, evolution and origins* (University of Toledo, 1977).
4. T. Gehrels (ed.), *Asteroids* (University of Arizona Press, 1979) ; R.P. Binzel, T. Gehrels and M. Shapley Matthews (eds), *Asteroids II* (University of Arizona Press, 1989) ; W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds), *Asteroids III* (University of Arizona Press, 2003). Ce sont les trois gros livres de référence sur le sujet parus à dix ans, puis à quatorze ans d'intervalle.
5. J.-C. Merlin, *Les astéroïdes* (Tessier & Ashpool, 2003). Ce livre est une excellente mise au point sur un sujet en constante évolution.
6. *Collection des Minor Planet Circulars* (MPC) 1947-2011. Cette collection comporte plusieurs dizaines de milliers de circulaires et est l'un des outils de base du spécialiste.
7. M.-A. Combes, *Deux siècles de découvertes d'astéroïdes*, *L'Astronomie*, 115, pp. 17-28, 2001. Cet article a été écrit pour le numéro spécial *ASTÉROÏDES* de la revue *L'Astronomie*, préparé à l'occasion du bicentenaire de la découverte de Cérès.
8. L'utilisation de la méthode photographique pour les découvertes d'astéroïdes, à partir de 1891 (avec 323 Brucia), par Max Wolf (1863-1932) à Heidelberg et Auguste Charlois (1864-1910) à Nice, a permis dans un premier temps un triplement des découvertes, avec surtout un effort bien moindre. Elle rendait caduque du jour au lendemain l'ancienne méthode visuelle des chasseurs d'astéroïdes.
9. L'utilisation des caméras CCD pour la recherche des astéroïdes, mise au point à Kitt Peak par Tom Gehrels, au début des années 1980, a été une nouvelle révolution technologique. Elle a entraîné un décuplement des découvertes en permettant de recenser des objets beaucoup plus faibles.
10. M.-A. Combes, *Étude sur les magnitudes absolues des astéroïdes*, *L'Astronomie*, 85, pp. 413-433, 1971.
11. R. Greeley and R. Batson, *The NASA atlas of the Solar system* (Cambridge University Press, 1997). L'atlas de référence sur le Système solaire avec une cartographie de tous les objets connus (214 photos, 157 cartes).

12. M.-A. Combes, *Contribution à l'étude des EGA. Etude générale sur les astéroïdes qui s'approchent de la Terre et sur leurs relations avec l'impactisme terrestre* (thèse universitaire, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1979). C'est la première thèse soutenue sur le sujet et qui montre que les EGA et les astéroïdes ne sont que les deux faces d'un même problème.
13. Ce terme de *géocroiseurs*, nom proposé par Alain Maury, correspond aux *Earth-crossers* de langue anglaise qui regroupent les objets Apollo et Aten qui franchissent l'orbite terrestre.
14. Classification Combes-Meeus établie en 1974. Les sous-types sont utiles pour évaluer des orbites qui peuvent être de taille très différente.
15. J. Meeus, *Eros et son apparition de favorable de 1974-1975*, *L'Astronomie*, 88, pp. 295-304, 1974.
16. C.J. van Houten, I. van Houten-Groeneveld, P. Herget and T. Gehrels, *The Palomar-Leiden Survey of faint minor planets*, *Astronomy and Astrophysics supplement series*, 2, pp. 339-448, 1970. L'histoire d'un survey unique (le PLS) qui a permis aux époux van Houten, à l'observatoire de Leyde aux Pays-Bas, de découvrir près de 2000 astéroïdes sur des clichés pris au Mont Palomar par Tom Gehrels.
17. M.-A. Combes et J. Meeus, *Le retour de Toutatis*, *L'Astronomie*, 106, pp. 4-10, décembre 1992. L'histoire d'un astéroïde exceptionnel et particulièrement dangereux dans l'avenir.
18. La liste des objets perdus s'allonge malheureusement. Certains petits objets observés quelques jours seulement ont peu de chance d'être réobservés dans l'avenir. Par contre, sauf dans de rares cas, un mois d'observations assure en principe une réobservation ultérieure.
19. L.D. Schmadel, *Dictionary of minor planet names* (Springer Verlag, 2012). Ce gros livre contient 1464 pages et est publié en deux tomes. La première édition de cet ouvrage de référence est parue en 1992. Il a été reconnu comme document officiel par l'Union Astronomique Internationale. Depuis 1947, les noms sont officialisés par leur parution dans les *Minor Planet Circulars* (MPC). Plus de 17 500 noms sont officiellement reconnus fin 2012.
20. Les désignations provisoires des astéroïdes, utilisées depuis 1925 sous leur forme définitive, correspondent à des critères bien précis. L'année est celle de la découverte, la première lettre celle de la *quinzaine* de la découverte (le I et le Z ne sont pas utilisés) et la seconde celle du numéro d'ordre dans cette quinzaine (le I n'est pas utilisé). Après 25 découvertes, on recommence avec l'indice 1, puis avec l'indice 2 et ainsi de suite.
21. J. Meeus et M.-A. Combes, *Les earth-grazers (ou EGA), des petits astres qui frôlent la Terre*, *L'Astronomie*, 88, pp. 194-220, 1974 ; suppléments dans *L'Astronomie* sous la signature M.-A. Combes et J. Meeus : série des

"Nouvelles des earth-grazers" (entre 1975 et 1991) ; suppléments dans *Observations et Travaux* : série des "Chroniques des objets AAA (entre 1992 et 1997). Au total plus de 30 articles qui relatent chronologiquement les découvertes et l'amélioration des connaissances sur le sujet.

22. A.S. Rivkin, *Asteroids, comets, and dwarf planets*, Greenwood Press, 2009. Un livre récent qui explique bien la nature des petits corps du Système solaire.

23. M.J. Gaffey, J.F. Bell and D.P. Cruikshank, *Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy*, pp. 98-127, in *Asteroids II*, op. cit., 1989.

24. M.-A. Combes, *Note sur les EGA planétaires et cométaires*, L'Astronomie, 94, pp. 131-137, 1980.

25. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 18)*, *Observations et Travaux*, 47-48, pp. 1-13, 1996. Sur l'approche de 1996 JA1 et l'hypothèse Vesta, voir pp. 4 à 7.

26. F. Pilcher and J. Meeus, *Tables of minor planets* (private edition, 1973).

27. C'est la règle. Chaque fois qu'un NEA ou qu'une comète est découvert, on recherche avec une éphéméride rétroactive si le nouvel objet a déjà laissé sa trace sur d'autres clichés pris antérieurement dans d'autres observatoires.

28. Wilson-Harrington est considéré, lui aussi, à la fois comme un astéroïde (n° 4015) et comme une comète (numéro 107P/). Cet objet a donc une double numérotation sous le même nom.

29. On ne peut que regretter davantage l'échec de la mission *Clémentine 1* en 1994. Voir à ce sujet la note 10 du chapitre 5

30. H. Morin, *Une bataille de boules de glace cosmiques divise les astrophysiciens*, *Le Monde*, p. 14, 3 janvier 1998.

31. Z. Sekanina, *A core-model for cometary nuclei and asteroids of possible cometary origin*, pp. 423-428, in *Physical studies of minor planets*, op. cit., 1971.

32. On calcule le diamètre moyen d (en km) avec la formule suivante : $\log d = C - (H/5)$, dans laquelle C est une "constante" qui dépend du type physique et de l'albédo, et H la magnitude absolue. On utilise les constantes suivantes : type D = 4,00 ; type C = 3,90 ou 3,80 ; type M = 3,55 ; type S = 3,50 ; type E = 3,40 et type V = 3,30. Cette formule donne de très bonnes approximations. Quand on ignore le type physique, on utilise la constante moyenne $C = 3,50$.

33. Voir la référence 10. Il est clair que pratiquement tout reste à faire pour les NEA de moins de 1 km de diamètre moyen.

34. Une orbite de *quasi-collision* ne veut pas dire obligatoirement collision prochaine, mais simplement que les orbites de la Terre et celle de l'astéroïde (ou de la comète) sont très proches l'une de l'autre.
35. O. de Goursac, *Toutatis : une première cartographie*, L'Astronomie, 110, pp. 74-75, 1996.
36. M.-A. Combes et J. Meeus, *Apophis, l'astéroïde qui fait peur*, L'Astronomie, 119, pp. 488-492, 2005.
37. Il ne faut pas trop se focaliser sur cette fréquence d'élimination qui n'est que le résultat et l'analyse de statistiques qui varient sans cesse, mais il s'agit d'un ordre de grandeur acceptable.
38. Ces statistiques concernent uniquement les NEA, car Mars est frôlée par de nombreux autres objets, dénommés Mars-crossers. Mars est une planète très menacée par les corps cosmiques qui fréquentent sa zone orbitale.
39. B. Booth et F. Fitch, *La Terre en colère. Les cataclysmes naturels* (Seuil, 1980). Titre original : *Earthshock* (1979).
40. J.-L. Schneider, *Les traumatismes de la Terre*, Société Géologique de France - Vuibert, 2009. Un excellent livre qui traite des divers phénomènes à l'origine de catastrophes pour les sociétés humaines.
41. H. Kanomari, *The energy released in great earthquakes*, Journal of Geophysical Research, 82, 20, pp. 2981-2987, 1977.
42. R. Madariaga et G. Perrier, *Les tremblements de terre* (Presses du CNRS, 1991).
43. Ce livre explique les problèmes concernant les magnitudes et donne les formules pour relier les diverses magnitudes les unes aux autres. J'utilise la formule donnée par les auteurs (p. 195) qui relie la magnitude à l'énergie : $\log W = 1,5 M_w + 4,8$, dans laquelle W est l'énergie exprimée en joules et M_w la *magnitude* basée sur le moment sismique. Comme le disent eux-mêmes les auteurs, il s'agit d'une énergie *minimale*.
44. A. Rittmann, *Les volcans et leur activité* (Masson, 1963). Un vieux livre très utile pour connaître les grandes éruptions du passé.
45. Collectif, *Les volcans* (Time-Life, 1996).
46. V. Clube et B. Napier, *Hiver cosmique*, Le jardin des Livres, 2006. C'est la version française du fameux livre paru en anglais en 1990 : *The cosmic Winter*. Un livre fondamental pour comprendre le catastrophisme d'origine cosmique et ses implications sur les sociétés humaines.

CHAPITRE 7

LES COMÈTES

Un danger connu depuis la nuit des temps

Les comètes sont connues depuis la plus haute Antiquité (1/2). Elles ont toujours été considérées avec crainte par les peuples anciens et ceux du Moyen Age (3), qui les soupçonnaient, et peut-être pas toujours à tort, nous le verrons au chapitre 16, d'apporter sur Terre toutes sortes de calamités, de maladies et notamment la peste.

Leur intérêt auprès des foules les plus ignorantes des choses de l'astronomie est toujours venu, bien sûr, de leur aspect spectaculaire et parfois effrayant. Il suffisait, en effet, aux gens de regarder le ciel nocturne avec un minimum d'attention pour détecter ces visiteuses indésirables, dont l'éclat pouvait souvent être comparé à celui des étoiles les plus brillantes à une époque où la voûte étoilée brillait encore de tous ses feux.

J'ai déjà parlé du sujet dans la partie historique, car les comètes, bien plus encore que les astéroïdes qui sont une découverte récente (1801 à 1807 pour les quatre premiers : Cérès, Pallas, Junon et Vesta), ont fait fantasmer toutes les générations de scientifiques depuis plus de 2500 ans avec l'émergence de la science grecque. Aristote (384-322) a observé, encore enfant, la fameuse comète qui porte son nom. Il ne l'a jamais oubliée. Pline l'Ancien (23-79) a rappelé l'existence de la terrible comète qui a ravagé l'Égypte et coloré la mer Rouge. Beaucoup plus tard, c'est William Whiston (1667-1752) qui a fait des comètes *l'instrument* du Déluge et de la fin du monde à venir choisi par le Créateur pour punir les humains récalcitrants.

A toutes les époques, les comètes ont fait peur. La comète, c'est la peur du cataclysme, c'est la peur d'un monde inconnu, c'est la peur du monde extérieur, c'est la matérialisation de la colère divine. Dans son livre sur le sujet, *Le retour de la comète*, Jean-Marie Homet explique fort bien ce phénomène sociologique, quasiment obligatoire avant l'époque scientifique, et qui a même survécu bien après :

" Les inondations, la sécheresse, les orages, les vents, le froid, la chaleur, la mort des personnages illustres, c'est la comète. Les incendies, les tremblements de terre, les raz de marée, les ouragans, c'est la comète. Les guerres, les défaites, les meurtres, les crimes, les hérésies, c'est la comète. Elle annonce tout, elle informe de tout, elle est la cause de tout. Elle est à la fois la parole et la main de Dieu, courroucé par le comportement des hommes. En effet la comète est perçue comme le signe de la colère divine et une punition nécessaire. " (4)

Il faut avoir à l'esprit ce parti pris anti-comète (cette peur) venu du fond des âges pour bien comprendre l'importance de la découverte fondamentale de Edmond Halley (1656-1742) : les comètes sont des astres périodiques comme les autres, dont on peut prévoir le retour. Ce fut une véritable révolution épistémologique, en 1759, quand la comète annoncée par Halley réapparut dans le ciel près de la position et dans les délais annoncés.

Anatomie et composition des comètes

Plusieurs milliers de spécialistes, depuis des siècles, ont fait le maximum pour que les comètes soient enfin compréhensibles par les hommes, pour qu'elles laissent déchiffrer les détails cachés de leur anatomie et de leur composition. Ce n'est que dans le dernier quart du XX^e siècle que des progrès décisifs ont pu être accomplis, notamment grâce aux sondes spatiales envoyées à la rencontre de P/Halley lors de son passage près du Soleil en 1986.

Les différents modèles de noyaux

On sait depuis longtemps que les noyaux cométaires sont des petits corps célestes, d'un diamètre ordinairement de taille kilométrique et même parfois plus rarement décakilométrique, constitués principalement de glace d'eau, de roches et de poussières dans des proportions variables.

Progressivement, à partir de ce constat sommaire, plusieurs modèles ont été proposés pour répondre aux observations (5/6), sans jamais perdre de vue que, là comme ailleurs en astronomie, la réalité peut être multiple et évoluer avec le temps. Ainsi un noyau "nouveau" est très différent d'un noyau "usé" qui devient progressivement astéroïdal (7) quand il a perdu la quasi-totalité de ses éléments volatils.

Je vais dire quelques mots sur les principaux modèles de noyaux, car selon leur configuration, leur densité et leur composition, les conséquences en cas d'impact peuvent être différentes.

– *Le conglomérat de glaces*. C'est le fameux modèle de la *boule de neige sale*, proposé par Fred Whipple (1906-2004) en 1950. En fait, il s'agirait d'un mélange de glace d'eau, de grains de poussière de toutes tailles, de dioxyde de carbone et d'autres gaz gelés, avec parfois des molécules plus complexes, comme le formaldéhyde et le cyanoacétylène. Selon les spécialistes actuels, les éléments volatils n'existeraient pas sous la forme de glace pure, mais sous celle d'*hydrates* et de *clathrates* (8).

– *L'agrégat de flocons*. C'est le modèle fractal, proposé par Bertram Donn en 1985. Des flocons de matière interplanétaire et interstellaire s'agglutinent pour former des corps de taille cométaire.

– *L'amoncellement de débris primitifs*. C'est le modèle de l'empilage progressif de blocs primordiaux et hétéroclites, proposé par Paul Weismann en 1986.

– *Le modèle mixte : roches + glace collée.* C'est le modèle mi-roches/mi-glaces, proposé par Tamas Gombosi et Harry Houpis en 1986 (9), et qui paraît le mieux répondre à la majorité des observations. C'est un agglomérat de particules d'origines diverses, liées entre elles par un "ciment" et qui peuvent retrouver leur autonomie après une fragmentation ou une désintégration. Des parties de comètes (les roches) n'ont pas d'activité cométaire, seules les parties glacées sont soumises à la sublimation.

L'activité des noyaux

Depuis l'observation de P/Halley en 1985-1986, on a eu la confirmation que l'activité cométaire prend naissance dans un nombre limité de zones à la surface du noyau et uniquement du côté tourné (chauffé) vers le Soleil. Cette activité se caractérise par des émissions de matière (poussières) et de gaz à partir des quelques plages actives. Les spécialistes ont noté que les jets se désactivent rapidement lorsque les plages actives retournent dans l'hémisphère non éclairé, du fait d'un phénomène classique de recondensation.

L'activité cométaire est très variable selon l'âge de la comète, ce qui paraît assez logique. Les comètes neuves, même minuscules comme C/Sugaino-Saigusa-Fujikawa (diamètre de 800 mètres seulement), ont une activité maximale pouvant atteindre de 40 à près de 100 % de la surface. P/Halley, comète à mi-vie active, avait une fraction active de 20 % environ à son dernier passage, ce qui n'est pas négligeable. Par contre, les comètes *usées*, comme P/Schwassmann-Wachmann 1 ou P/Encke, n'ont plus que 1 ou 2 % de surface active. Les comètes à l'agonie (qui sont déjà quasi astéroïdales), comme P/Neujmin 1, P/Tempel 2, P/Arend-Rigaux ou C/IRAS-Araki-Alcock, ont moins de 1 % de surface active. Ces comètes sont presque des comètes *mortes*, ou seulement *en sommeil* pour certaines, car un impact peut percer parfois la croûte protectrice accumulée au fil des passages près du Soleil et libérer provisoirement un résidu de matières volatiles. C'est ce qui est arrivé à P/Elst-Pizarro en 1996, comme je l'ai expliqué au chapitre 6.

La sublimation des éléments volatils

Au fur et à mesure qu'une comète se rapproche du Soleil, son noyau se réchauffe. Vers 600 MK (soit 4,0 UA), les glaces sont sujettes à la *sublimation*, libérant par là même une quantité variable de gaz et de poussières. C'est ainsi que se forme progressivement la *chevelure* de la comète dont le diamètre peut approcher 100 000 km, et même plus dans certains cas.

Dans un deuxième temps, c'est la queue qui se forme à partir de la chevelure, une queue double, on le sait, l'une dite queue de plasma et l'autre dite queue de poussières.

La sublimation des éléments volatils (10) est la conséquence directe du chauffage du noyau par le Soleil. Ces éléments volatils donnent d'abord des

molécules mères (du genre HCN, H₂O, CO, CO₂, CH₃OH, H₂CO), qui elles-mêmes se dissocient en molécules filles, qui sont des radicaux, des ions et des atomes (du genre CN, H, OH, O, CO⁺, C, CO, CH, CH₃O). Toute cette matière est libérée dans l'espace et vient enrichir la poussière cosmique.

Quand la sublimation ne peut plus se faire (comètes mortes ou en sommeil), la comète se présente sous la forme d'un *astéroïde cométaire* qui est le stade final avant la désintégration, ou éventuellement l'impact cosmique.

Les fortes approches des comètes à la Terre

L'apparition des ordinateurs et des logiciels de calcul a facilité d'une manière incroyable le calcul des orbites cométaires, permettant d'atteindre une précision impensable jadis. Il a été possible de calculer toutes les approches à la Terre pour toutes les comètes connues depuis l'Antiquité, mais avec une précision bien sûr différente selon le nombre d'observations disponibles pour chacune d'entre elles. Pour les comètes anciennes, on doit se limiter souvent à trois ou quatre bonnes observations qui ne permettent d'obtenir que des éléments orbitaux approximatifs, et donc des approches du même ordre. Par contre, pour les approches modernes, ces approches sont souvent connues avec une grande précision (toujours avec au moins quatre décimales) et sont d'une fiabilité remarquable.

On a recensé une vingtaine d'approches certaines à moins de 0,100 UA de la Terre, ce que l'on considère comme de fortes approches (11). C'est vraiment très peu, et cela montre bien que les approches serrées des comètes *actives* à notre planète sont beaucoup plus rares que celles des astéroïdes (astéroïdes *cométaires* inclus) qui se chiffrent, elles, par milliers par siècle. On connaît également une douzaine d'autres fortes approches possibles antérieures à l'année 1500, mais les données les concernant restent très incertaines du fait d'un nombre d'observations précises insuffisant. Les archives chinoises ont permis heureusement de confirmer l'existence de certaines comètes du passé, restées totalement ignorées en Europe.

Il y a lieu d'insister sur la rareté de ces fortes approches. On en connaît six au XVIII^e siècle, quatre au XIX^e et quatre au XX^e, en dépit d'une multitude de découvertes. Elles peuvent se produire n'importe quand : aucune entre 1930 et 1983 et deux coup sur coup en mai et juin 1983. Elles ne concernent pas forcément des objets très brillants, ainsi les magnitudes absolues ont varié entre -3,5 (P/Halley en 837) et 6,0 (C/Sugano-Saigusa-Fujikawa en 1983). Seules P/Halley et P/Tempel-Tuttle figurent à plus d'une reprise (trois et deux fois). Le record des approches est déjà vieux de plus de deux siècles (D/Lexell en 1770).

Historique des huit très fortes approches cométaires à la Terre

Sur les vingt fortes approches certaines recensées, seulement huit sont considérées comme des très fortes approches, inférieures à 0,050 UA (1/20 d'unité astronomique ou 7,5 MK). Ce sont les suivantes (12/13).

– *1P/Halley*. La plus célèbre des comètes est connue depuis l'Antiquité (14/15) et ses trente approches près du Soleil depuis 240 av. J.-C. ont pu être calculées avec précision à partir des années 1970. Elle figure trois fois dans le tableau des fortes approches, mais elle a eu une seule très forte approche, celle du 10 avril 837, date à laquelle elle est passée à 0,0334 UA (5,00 MK) de la Terre. Elle était alors un astre superbe dans le ciel, de magnitude $-3,5$, et fut considérée comme un signe de Dieu par toute une population toujours angoissée par les "prodiges" visibles dans le ciel, à une époque particulièrement obscurantiste. On rapporte que le roi de France de cette époque, Louis le Débonnaire (778-840), fils de Charlemagne, y vit le présage de sa mort prochaine (il dut quand même attendre trois ans !).

– *55P/Tempel-Tuttle*. C'est la comète mère des *Léonides*, dont on sait qu'elle perd depuis longtemps une partie substantielle de sa matière. Elle figure deux fois dans le tableau. Elle a eu une très forte approche à la Terre le 26 octobre 1366 à 0,0029 UA (0,43 MK), sous le règne de Charles V le Sage (1338-1380), tout en ne dépassant pas la magnitude 2.

– *C/1702 H1 (comète La Hire)*. Cette comète a eu une approche à 0,0437 UA (6,54 MK) le 20 avril 1702, qui fut observée par Louis XIV (qui avait créé en 1666 l'Observatoire de Paris pour promouvoir l'observation astronomique) et sa cour. A cette époque, il n'y avait plus de peur panique à l'apparition d'une comète, mais au contraire (tout au moins dans les milieux cultivés) intérêt et même passion. Celle-ci fut spectaculaire ($m = -1,3$), mais ne fut visible que peu de temps.

– *C/1743 C1 (comète Grischow)*. Cette comète à orbite parabolique a eu une approche à 0,0390 UA (5,83 MK) le 8 février 1743, sans être vraiment spectaculaire, ce qui signifie qu'il s'agissait d'une comète de taille relativement modeste. Sa très faible inclinaison ($i = 2,3^\circ$) semble indiquer une origine dans la ceinture de Kuiper (voir plus loin).

– *D/Lexell*. Cette très remarquable comète, dont j'ai déjà parlé au chapitre 3, car elle a eu une importance considérable sur les idées de l'époque, détient le record des approches (pour les objets bien connus). Elle s'est approchée à seulement 0,0151 UA (2,26 MK) le 1^{er} juillet 1770 et eut une magnitude négative ($-1,3$). Cette comète a eu une histoire complexe et a donné bien du fil à retordre aux calculateurs. Elle n'est plus accessible actuellement, du fait d'un périhélie proche de Jupiter, mais elle sera peut-être de nouveau observable dans le futur.

– *3D/Biela*. Cette comète, nommée pour l'astronome autrichien Wilhelm von Biela (1782-1856), aujourd'hui désintégrée, est la comète mère des *Biélides*. Elle a eu une très forte approche à la Terre le 9 décembre 1805 : 0,0366 UA (5,48 MK). C'était une comète à courte période qui fut observée auparavant en 1772. Elle a joué un rôle très important dans le renouveau des idées catastrophistes (surtout religieuses), quand à l'occasion de son troisième retour observé, en 1826, Olbers signala pour la première fois qu'elle s'approchait à seulement 28 000 km (0,0002 UA) de l'orbite terrestre et que les deux orbites *se coupaient* donc pratiquement à l'échelle astronomique, avec les risques possibles de contamination et même de collision que cela comportait à l'occasion de passages ultérieurs. Cette catastrophe quasiment annoncée (et reprise au vol par les nombreux partisans d'une fin du monde imminente) fut évitée puisque, dès 1845, la comète Biela se cassa en deux morceaux avant de se désintégrer complètement et de produire les deux célèbres averses météoriques de 1872 et 1885.

– *7P/Pons-Winnecke*. C'est une comète à courte période très intéressante, connue depuis 1819 mais observée ensuite plus ou moins épisodiquement. Elle a la particularité de subir des modifications orbitales très sévères, notamment la distance périhélique qui a varié de près de 0,50 UA en moins de deux siècles, ce qui est énorme, dues en partie à des perturbations non gravitationnelles importantes. Elle a eu une très forte approche à la Terre le 26 juin 1927, à 0,0394 UA (5,89 MK), tout en restant à cette occasion relativement peu brillante ($m = 3,5$).

– *C/IRAS-Araki-Alcock*. Cette comète récente est restée célèbre pour s'être approchée à 0,0312 UA (4,67 MK) de la Terre le 11 mai 1983, la plus forte approche depuis celle de D/Lexell en 1770. Elle se caractérise par une très forte excentricité ($e = 0,990$) et une très forte inclinaison ($i = 73,3^\circ$) qui rend l'orbite dynamiquement très stable. Elle était quasiment *ponctuelle* lors de sa découverte et fut même prise pour un astéroïde dans un premier temps. D'abord considérée comme une comète minuscule, du fait de son faible éclat si près de la Terre ($m = 1,5$), elle a vu son diamètre réévalué par les mesures radar : noyau de l'ordre de 6 km. Cela s'explique par le fait que cette comète est un astre "usé" qui n'émet plus que très peu de poussières. C'est la conséquence de *milliers* de révolutions autour du Soleil (sa période actuelle est de l'ordre de 1000 ans). D'ici quelques dizaines de milliers d'années, elle deviendra un authentique astéroïde cométaire, avec un demi-grand axe qui n'évoluera probablement pas beaucoup, autour de 100 UA. Tous les 1000 ans environ, elle viendra près du Soleil, et peut-être à nouveau viendra frôler la Terre comme elle l'a fait en 1983.

Les éléments orbitaux des comètes qui ont frôlé la Terre

L'examen des éléments orbitaux correspondant aux 20 approches sûres recensées donne des indications intéressantes sur les orbites. 7 comètes ont une orbite rétrograde ($i > 90^\circ$) et 8 une orbite quasiment parabolique (e est très proche de 1,0 et donc a ne peut être calculé avec une précision acceptable). Pour celles qui ont un demi-grand axe mesurable, 4 circulent

dans l'anneau principal des astéroïdes (2,08-3,58 UA) et 5 autres entre 10 et 250 UA. Deux comètes ne pénétraient pas à l'intérieur de l'orbite terrestre l'année de leur forte approche. Il faut encore noter une particularité importante : toutes les catégories de comètes peuvent générer des approches serrées. Le détail est le suivant :

- des comètes à courte période (4) : Lexell, Biela, Pons-Winnecke et Schwassmann-Wachmann 3 ;
- des comètes de type Halley (2) : Halley et Tempel-Tuttle ;
- des comètes périodiques à longue période (3) : Schweizer, Tempel et IRAS-Araki-Alcock ;
- des comètes à orbite parabolique de différents types :
 - à faible inclinaison (2) : La Hire et Grischow ;
 - à inclinaison moyenne ou forte (2) : Charles Quint et Messier ;
 - à inclinaison $> 90^\circ$ (4) : Cassini, Bouvard-Herschel, Schmidt et Sugano-Saigusa-Fujikawa.

Plusieurs de ces comètes à longue période seront capturées par les grosses planètes dans l'avenir (surtout par Jupiter) à l'occasion d'approches futures dans le Système solaire intérieur. Elles verront donc leur période diminuer, et leur orbite (quasi) parabolique se transformer progressivement en orbite elliptique à moyenne, puis courte période.

Comètes à courte période et astéroïdes cométaires

Les comètes à courte période perdent continuellement de leur matière. De ce fait, elles deviennent rapidement à l'échelle astronomique, et d'autant plus vite que leur période de révolution et leur distance périhélique sont faibles et leur diamètre petit (formule de Öpik (16)), des objets astéroïdaux : des *astéroïdes cométaires*. Sauf celles qui disparaissent par désintégration comme D/Biela, qui n'a pas survécu à une première fragmentation simple, ou par émiettement progressif du fait d'un noyau "solide" à faible cohésion, conséquence d'une configuration structurale de mauvaise qualité.

Quand on parle de comètes, il faut bien prendre en compte deux épisodes successifs différents de leur vie, d'abord une phase active, ensuite une phase astéroïdale. Ces astéroïdes cométaires continuent d'avoir de fortes approches à la Terre (et aux autres planètes), en nombre beaucoup plus important que durant leur courte vie de comète active. On sait que la phase inactive finale peut être 1000 fois plus longue que la phase active initiale.

La liste des objets Aten-Apollo-Amor qui contenait moins de 800 objets en 1998 en contenait plus de 8000 en 2011, dix fois plus, seulement treize ans plus tard. Parmi ceux-ci, un nombre très significatif (le pourcentage de 25 % donné dans les années 1970 paraît insuffisant et pourrait en fait approcher les 40 %) concerne des astéroïdes cométaires. De tels objets peuvent parfois être repérés, de trois manières : 1/ par leurs éléments orbitaux (excentricité et/ou inclinaison cométaire) ; 2/ par leur association avec des familles de météores ; 3/ par leur type physique particulier (D ou C notamment).

Ainsi on connaît des objets à très courte période (y compris parmi le type Aten dont la période de révolution est inférieure à 1 an) qui sont probablement d'anciennes comètes et qui continuent de frôler la Terre plus ou moins épisodiquement. On voit bien qu'en fait la distinction entre astéroïdes et comètes ne se justifie que par certains points incontestables (origine, apparence cométaire, constitution physique...), mais une fois le dégazage terminé, les choses deviennent moins évidentes. Le problème des approches est un de ces dilemmes. Doit-on considérer les approches des astéroïdes cométaires comme des approches d'astéroïdes ou comme des approches de comètes ? La réponse n'est pas forcément évidente pour les spécialistes, car ils savent bien que l'impactisme cométaire et l'impactisme astéroïdal ont des conséquences différentes, du fait de la composition des divers objets. Un astéroïde ferreux ou rocheux n'a pas les mêmes caractéristiques qu'une simple boule de glace ou qu'un pseudo-noyau de particules hétéroclites plus ou moins bien agglomérées.

Le dénombrement des comètes

Plusieurs listes d'apparitions cométaires ont été publiées à partir du XVIII^e siècle. Depuis les années 1970, un catalogue de comètes, le *Catalogue of cometary orbits* (17), publié par le Minor Planet Center, sous la double signature de Brian Marsden et Gareth Williams, est constamment mis à jour, et les orbites des comètes nouvelles, mais aussi des anciennes, sont calculées avec le plus grand soin. En ajoutant les divers retours des comètes *périodiques*, on aboutit actuellement à un nombre de plusieurs milliers d'apparitions différentes.

Il est certain que le nombre de comètes actives existant dans le Système solaire est extrêmement élevé. On cite, en général, le nombre approximatif de 100 milliards d'objets différents. On connaît deux grands réservoirs de comètes, tous deux très différents et tout à fait inépuisables : le *nuage de Oort* et la *ceinture de Kuiper*. Les découvertes électroniques ont permis de multiplier d'une façon significative les objets accessibles.

Une fraction très faible de ces 100 milliards de comètes peut, suite à des perturbations stellaires, venir au voisinage du Soleil et de la Terre. Parmi celles-ci, seule une petite partie est susceptible d'être capturée par les grosses planètes (surtout par Jupiter) et donc de devenir des comètes périodiques. Mais compte tenu du réservoir de base extrêmement important, la très faible partie de comètes concernées se chiffre encore par millions. Elles ont été dans le passé, sont actuellement et seront dans l'avenir susceptibles de devenir, pour une période assez courte à l'échelle astronomique, des éléments permanents du Système solaire intérieur.

D'abord comètes actives durant quelques milliers ou dizaines de milliers d'années, puis pour certaines d'entre elles astéroïdes *cométaires* pendant quelques millions d'années, ces objets capturés pourront frôler la Terre, ou l'une ou l'autre des planètes voisines, et participer à leur manière, différente de celle des astéroïdes authentiques, à l'impactisme planétaire.

Les orbites des comètes

Les comètes parcourent des orbites qui sont soit elliptiques ($e < 1,0$), soit paraboliques ($e = 1,0$), soit légèrement hyperboliques ($e > 1,0$). Les inclinaisons ont toutes les valeurs possibles entre 0 et 90° (orbites directes) et 90 et 180° (orbites rétrogrades), en opposition avec les orbites planétaires qui sont toujours directes, avec un maximum de 17° pour Pluton.

On connaît actuellement environ 500 comètes à orbite elliptique, 500 à orbite parabolique et 250 à orbite hyperbolique, et bien sûr ce nombre augmente constamment. Par convention, on appelle comètes à *courte période*, celles qui ont leur période de révolution P inférieure à 200 ans. Les comètes à très courte période sont celles qui ont P inférieure à 12 ans, valeur de la période de Jupiter, la planète géante, de loin la plus massive et par conséquent la principale responsable de leur capture, même si l'influence de Saturne, Uranus et Neptune n'est pas négligeable pour autant.

Ce phénomène de capture (18) a été étudié par simulation sur ordinateur et il est maintenant bien connu. Les comètes à courte période ne peuvent exister qu'à partir d'orbites primitivement extérieures à celle de Neptune, à partir de deux "réservoirs" différents : le nuage de Oort et la ceinture de Kuiper. Au début des années 1970, Edgar Everhart (1920-1990) a montré que la majorité des comètes capturées avec une courte période ont une faible inclinaison ($i < 9^\circ$) et une distance périhélique originelle (c'est-à-dire en entrant pour la première fois dans le Système solaire intérieur) proche de l'orbite de Jupiter (probablement entre 4,0 et 6,0 UA). Ce volume d'espace voisin de Jupiter, mais cependant relativement vaste, est appelé *zone de capture* et a été retenu par Everhart pour ses tests et ses simulations. Sur environ 7700 comètes ayant leur périhélie originel dans cette zone, les simulations montrent que la plupart d'entre elles furent envoyées sur des orbites hyperboliques après le premier passage, qui s'avère très souvent décisif. Quelques-unes furent suivies sur 2000 retours successifs et seulement une soixantaine (sur 7700) furent capturées définitivement avec des orbites à très courte période, tout à fait compatibles avec celles des orbites connues. Ainsi, il semblerait que pas plus de 1 comète sur 100 est capturée et devient un membre provisoire du Système solaire intérieur.

Cependant, depuis les travaux de Everhart, les choses se sont compliquées dans la mesure où les astronomes ont bien compris la réalité d'une double source pour les comètes, et aussi l'existence d'une nouvelle catégorie de *comètes-astéroïdes*. Ces objets de Kuiper passent la majorité de leur vie dans la ceinture de Kuiper, mais leur orbite évolue à la suite de perturbations catastrophiques et ils sont propulsés sur des orbites plus petites. Certains de ces objets mixtes, dont le diamètre dépasse couramment 100 km, passent souvent par une étape intermédiaire : *l'étape centaure* (du nom des premiers objets connus : Chiron et Pholus) (19). En quelques années on en a découvert plusieurs centaines, toutes avec une orbite instable.

Les deux réservoirs de comètes

On distingue deux réservoirs très différents de comètes qui ont été mis en évidence au début des années 1950, le premier par Jan Oort (1900-1992) et le second par Gerard Kuiper (1905-1973). Mais le second n'a vu sa réalité confirmée qu'au début des années 1990, grâce à la révolution technologique apportée par l'utilisation de caméras CCD très performantes, couplées avec des télescopes de grand diamètre sur des sites d'observation privilégiés. Les noms des deux pionniers de ces découvertes doivent être mentionnés ici, car ils ont permis une nouvelle avancée fondamentale. Ce sont David Jewitt et Jane Luu, deux astronomes américains qui travaillaient sur le site de Mauna Kea, à Hawaii, avec un télescope de 2,2 mètres d'ouverture.

Le nuage de Oort

C'est une "coquille" sphérique dont le Soleil est le centre (les inclinaisons ont toutes les valeurs possibles), que l'on peut situer en gros entre 2000 et 100 000 UA, c'est-à-dire une toute autre population que celle existant dans le Système solaire intérieur. On a tendance, de nos jours, à le diviser en deux parties bien distinctes : le *nuage externe*, compris entre 10 000 et 100 000 UA et le *nuage interne*, compris entre 2000 et 10 000 UA. Le nuage de Oort contient un nombre illimité d'objets (plusieurs milliards à coup sûr). Celles qui sont "précipitées" dans le Système solaire intérieur le sont à la suite de perturbations stellaires (passage d'une étoile à proximité relative du Soleil). Le diamètre de ces objets peut varier de quelques km à plusieurs milliers de km. Mais en règle générale, la quasi-totalité des membres de ce groupe n'ont aucune raison de venir dans le Système solaire interne. Ce sont des astres primordiaux, c'est-à-dire directement issus de la formation du Système solaire, amorcée il y a plus de 4,6 milliards d'années par la condensation du disque de gaz et de poussière présolaire, en rotation sur lui-même, et qui engendra, outre le Soleil, les planètes et leurs satellites, d'innombrables résidus qui n'ont pas tous disparus par la suite.

Les statistiques ont montré que certaines comètes "neuves" (celles qui viennent pour la première fois dans le Système solaire intérieur) arrivent prioritairement d'une région située entre 40 000 et 50 000 UA (dans le nuage externe donc). Cela tendrait à montrer qu'il existe certaines zones plus denses en noyaux cométaires vers cette distance. On considère, en général, qu'une comète dont le demi-grand axe est inférieur à 10 000 UA (issue du nuage interne donc) n'est pas une comète neuve au sens strict, et que celles qui ont un tel demi-grand axe ont déjà effectué quelques (rares) apparitions près du Soleil. De telles comètes ont déjà évolué dynamiquement. Ainsi la fameuse comète West, l'une des plus belles du XX^e siècle, qui est venue près du Soleil en 1976 et dont le demi-grand axe était de l'ordre de 6800 UA (d'où une période voisine de 560 000 ans) n'était pas une comète neuve, puisqu'elle nous a déjà rendu plusieurs visites dans le passé, fort espacées dans le temps à l'échelle humaine, mais pas à l'échelle astronomique. Du fait de sa rupture en quatre morceaux lors de sa dernière visite, elle ne reviendra plus, c'est quasiment certain. Aucune comète est éternelle.

Les perturbations ne sont pas seulement dues aux passages erratiques d'étoiles près du Soleil, même si l'on sait que celles-ci en sont les responsables essentielles, ni aux forces de marée générées par la rotation de la Galaxie. L'astrophysicien allemand Ludwig Biermann (1907-1986) a montré le premier que les grands nuages moléculaires que traverse parfois le Système solaire contribuent eux aussi à perturber sensiblement les comètes du nuage de Oort. Certains de ces nuages moléculaires sont très massifs et peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers de fois la masse du Soleil, dans un volume de plus de 100 années-lumière de diamètre. Depuis leur formation, il y a 4,6 milliards d'années, le Soleil et sa nombreuse famille ont pu traverser ce genre de nuage géant une bonne dizaine de fois. Il n'est pas exclu alors qu'une quantité anormale de comètes ait pu être injectée en peu de temps dans le Système solaire intérieur. La traversée de nuages moléculaires plus petits, de l'ordre de 1000 à 10 000 fois la masse du Soleil, est bien sûr beaucoup plus fréquente. Elle serait de l'ordre d'une fois tous les 10 millions d'années (c'est-à-dire d'une centaine par milliard d'années), avec des conséquences moindres, mais cependant nullement négligeables.

On voit ainsi que ces perturbations, qui peuvent être de nature différente, sont largement suffisantes pour permettre un renouvellement permanent de la matière cométaire près du Soleil, et aussi expliquer la cratérisation qu'ont subi les diverses planètes et satellites, cratérisation qui, on le sait maintenant, était à la fois d'origine planétaire, mais aussi cométaire.

La ceinture de Kuiper

C'est en fait un *disque relativement plat* (quelques degrés pour les inclinaisons) situé entre environ 38 et 100 UA (peut-être même 200 UA) du Soleil, donc incontestablement une composante du Système solaire interne. Il pourrait contenir plusieurs millions d'objets (comètes et/ou astéroïdes), dits *objets de Kuiper*, de 10 à plus de 1000 de km de diamètre, composés de *glace* mais aussi probablement de *roches*. Ceux qui "décrochent" de cette ceinture le font à la suite de perturbations planétaires, mais en général les excentricités sont modestes (très souvent inférieures à $e = 0,20$) et les orbites stables. Ce qui signifie que beaucoup de membres de ce groupe pourraient être des objets primordiaux.

Le bond technologique décisif du début des années 1990 a permis de découvrir plus d'un millier d'objets de Kuiper appartenant à la ceinture, parmi laquelle on distingue différents groupes aux caractéristiques orbitales distinctes que l'on regroupe en deux catégories principales :

– les *Plutinos* qui forment la bordure interne de la ceinture. Ces objets qui ont *a* compris entre 38 et 42 UA apparaissent très nombreux. Comme Pluton (et son satellite Charon), ils ont la particularité très importante d'être en résonance 3/2 avec Neptune et sont donc protégés de toute approche avec cette planète qui pourrait s'avérer dangereuse et signifier pour eux "le début de la fin", c'est-à-dire la plongée dans le Système solaire intérieur, avec les conséquences qui en découlent sur leur espérance de vie.

– les autres KBO (pour *Kuiper Belt Objects*) qui ont entre 40 et 100 UA (et même plus pour certains) et qui ne bénéficient pas de cette résonance 3/2. Ce sont des membres de la ceinture de Kuiper qui ont en principe une orbite très stable et beaucoup doivent exister depuis la formation du Système solaire. C'est parmi eux que suite à des perturbations, principalement dues à Neptune, que certains objets voient leur excentricité augmenter et leur périhélie diminuer, avec les risques majeurs que cela comporte : approche à Neptune et injection sur une orbite plus petite, souvent dans un premier temps de type *centaure*, ou injection directe avec une excentricité quasi parabolique dans le Système solaire intérieur et avec un périhélie à l'intérieur de l'orbite de Jupiter.

Les objets de Kuiper sont soit des astéroïdes, soit des comètes, soit des *objets mixtes* qui ont à la fois des caractéristiques physiques planétaires (noyau rocheux notamment) et cométaires (enveloppe de glace et de poussières agglomérées). Bien sûr, il existe des milliards d'objets plus petits que les quelques milliers qui sont observables de la Terre avec les moyens actuels et qui doivent avoir quelques centaines de mètres seulement dans le bas de la fourchette. La quasi-totalité de ces petits objets resteront à jamais indécélables, sauf s'ils sont éjectés de la ceinture de Kuiper et survivent ultérieurement sur des orbites beaucoup plus petites (familles cométaires de Jupiter et Saturne). Ils pourraient être alors découverts comme des NEA classiques s'ils s'approchent suffisamment de l'orbite terrestre.

Les centaures et autres objets apparentés

Il est apparu, depuis l'utilisation des caméras CCD qui permettent de repérer des astres beaucoup plus faibles que précédemment, qu'il existe de nombreux objets circulant d'une manière autonome (comme des mini-planètes) entre les orbites de Jupiter et de Neptune. Tous sont enregistrés comme astéroïdes (puisque n'ayant pas d'activité physique apparente), mais quasiment tous peuvent être considérés comme *d'origine cométaire* (ou *astéroïdo-cométaire* pour les objets mixtes), puisque issus très probablement des deux réservoirs cométaires. Ce sont les centaures.

Cette étape centaure semble être une étape intermédiaire "normale" pour les objets du Système solaire externe. Certains objets de Kuiper éjectés de la ceinture sont injectés dans le Système solaire intérieur sur des orbites provisoires et chaotiques. Ces orbites évoluent ensuite sans cesse au gré des perturbations planétaires, avec une tendance à la diminution progressive du demi-grand axe. Leurs jours, à l'échelle astronomique, sont comptés. J'en parlerai plus loin : la fragmentation, l'émiettement, la désintégration, la disparition totale à long terme (parfois aussi une expulsion salvatrice) les guette. Nous avons l'exemple actuel d'un tel objet dont je parlerai longuement plus loin, car il concerne l'histoire des hommes : c'est Hephaistos, un ancien centaure qui a fini sa vie d'astre indépendant à la suite d'une fragmentation consécutive à une forte approche à l'une des planètes intérieures.

Damocles

Il s'agit d'une ancienne comète, découverte en 1991 en Australie par Robert McNaught, qui est issue du nuage de Oort et qui ensuite, à l'occasion d'une intrusion dans le Système solaire intérieur, a été capturée par Uranus (20). N'ayant pas d'activité cométaire, cet objet a été catalogué, comme c'est toujours le cas dans cette situation fréquente, comme un astéroïde, bien que son origine cométaire ne fasse pas de doute. Ses éléments orbitaux sont exceptionnels, uniques actuellement : $a = 11,89$ UA (il circule donc en moyenne entre Saturne et Uranus), $e = 0,87$ et $i = 62^\circ$. Damocles s'approche de l'orbite de Mars au périhélie ($q = 1,58$ UA). Les calculs montrent que cette orbite chaotique est très provisoire et qu'elle va probablement évoluer, avec une diminution de la période et du demi-grand axe. Damocles deviendra un objet Apollo, avec un périhélie à l'intérieur de l'orbite terrestre.

Il est devenu le prototype des "objets venus d'ailleurs" qui peuvent devenir dangereux à long terme pour la Terre (et les autres planètes intérieures) dont on soupçonnait depuis longtemps l'inclusion possible dans le Système solaire proche, mais dont on attendait avec impatience le premier exemplaire. Bien qu'il soit l'un des plus petits "astéroïdes" extérieurs actuellement connus, son diamètre est de l'ordre de 15 km ($H = 13,3$, type physique D probable), ce qui fera de lui le plus gros des objets Apollo, dont le diamètre n'atteint qu'exceptionnellement 10 km. Avec une vitesse au périhélie qui sera de l'ordre de 40 km/s, il pourrait devenir à long terme (quelques dizaines de milliers d'années) un objet dangereux pour la Terre et la vie qu'elle abrite. Mais nous n'en sommes pas encore là !

Damocles a permis de montrer aux astronomes, mais aussi aux autres scientifiques concernés, l'un des mécanismes d'introduction (et de renouvellement permanent, inéluctable à l'échelle astronomique) d'anciennes comètes à longue période dans le Système solaire intérieur. Ce mécanisme comporte quatre étapes principales :

1. *perturbations stellaires* qui les chassent du nuage de Oort et en précipitent certaines dans le Système solaire intérieur ;
2. *capture de l'une d'entre elles* par l'une des grosses planètes (Jupiter principalement, mais aussi Saturne, Uranus et Neptune) sur une orbite chaotique à courte ou moyenne période ;
3. *évolution de cette orbite*, avec parallèlement diminution progressive, puis disparition totale des éléments volatils, et possibilité d'approches serrées aux planètes ;
4. *impact possible* sur une planète avec éventuellement formation de cratère et conséquences sur la vie s'il s'agit de la Terre.

Cet enchaînement d'événements explicite fort bien les "morts en masse" mises en évidence par les spécialistes des sciences de la vie, et symbolisées

par la mort des dinosaures, il y a 65 millions d'années, dont il sera question au chapitre 12. Damocles permet de montrer une bonne fois pour toutes que ce mécanisme de capture n'est pas une "vue de l'esprit", et surtout de rappeler que si les comètes et les astéroïdes "dangereux" n'existent pas forcément actuellement (et à certaines époques en général), ils peuvent être introduits *épisodiquement* (et non pas cycliquement) dans le Système solaire intérieur à la suite de perturbations stellaires.

Chiron

Cet objet est le prototype des *centaures*. Il a été découvert en 1977 à Palomar par Charles Kowal (1940-2011) (21) et logiquement catalogué comme un astéroïde, puisqu'il s'était jusqu'alors toujours montré ponctuel. En effet, on l'a retrouvé sur plusieurs plaques photographiques prises antérieurement, la plus ancienne remontant à 1895. Ce n'est que bien plus tard, en 1988, que l'on commença à soupçonner une activité cométaire, liée à un sursaut anormal de magnitude (son éclat doubla quasiment) en relation avec le rapprochement de Chiron vers son périhélie. Apparemment, le léger réchauffement de la surface a été suffisant pour "réveiller" la grosse boule de glace et de roches en léthargie sur la plus grande partie de son parcours, et il a bien fallu (re)considérer Chiron comme une comète.

Cet objet circule sur une orbite instable avec $a = 13,74$ UA, $e = 0,38$ et $i = 6,9^\circ$. Sa période est donc de 51 ans. Il vient au périhélie à 8,54 UA (la dernière fois en février 1996). Tous les calculs montrent que l'orbite est chaotique et donc obligatoirement récente. Il a décroché d'une orbite stable dans la ceinture de Kuiper à la suite de perturbations exceptionnelles, pour suivre provisoirement une orbite de type centaure comme actuellement.

Chiron est le premier spécimen d'une nouvelle population d'objets, beaucoup plus gros que les comètes normales, et *à la fois comète et astéroïde* (22) . Des observations dans l'infrarouge ont montré qu'il s'agit d'un objet de forme grossièrement sphérique, mais qui présente quand même des variations régulières de 9 % dans sa courbe de lumière, avec une période de rotation de 5,92 heures et un albédo de l'ordre de 0,10, le double de ceux des objets de type C. Un tel albédo suggère que Chiron est probablement constitué en surface d'un mélange de roches, de poussières, de gaz gelés et aussi de glace. C'est celle-ci qui se sublime et qui provoque les sursauts d'éclat observés. La présence d'une légère chevelure de glace et de poussières prouve qu'un mécanisme, que l'on suppose être dû principalement à la sublimation, éjecte de la surface de Chiron ses composants les plus volatils. On a noté entre autres la présence de cyanogène (CN) dans cette chevelure.

Le diamètre de Chiron n'est pas encore connu avec précision. Il a $H = 6,0$, mais comme son albédo est nettement plus élevé que celui des objets de type C et D, ce diamètre pourrait être de l'ordre de 200 km. Ce n'est pas un diamètre de comète classique, telle qu'on la concevait jusqu'alors, qui sauf rares exceptions, ne dépasse pas 50 km. En fait, toutes les comètes périodiques ont plutôt des diamètres de l'ordre de 5 ou 10 km, souvent

moins même. Chiron fut le premier centaure repéré, mais on en connaît déjà de nombreux autres, tels Pholus et Nessus. Le XXI^e siècle permettra d'en découvrir des centaines de nouveaux.

La désintégration des comètes

Je vais parler maintenant du problème de la fragmentation et de la désintégration des comètes à travers deux exemples différents mais très significatifs. Il faut bien comprendre, en effet, que ce problème est crucial pour expliquer le renouvellement constant de la matière dans le Système solaire intérieur. Des comètes sont capturées, elles se fragmentent, certains débris heurtent les planètes, d'autres se désagrègent en poussière cosmique, c'est la règle immuable depuis des milliards d'années et pour des milliards d'années encore car la matière disponible dans le nuage de Oort et dans la ceinture de Kuiper est inépuisable.

La comète d'Aristote et le groupe de Kreutz

On connaît cette comète (et ses multiples résidus *ultérieurs*) depuis l'époque d'Aristote (23) qui l'observa lui-même en -371 alors qu'il n'était qu'un enfant de 12 ans. Elle fut observée très près du Soleil à l'horizon ouest et, paraît-il, sa queue s'étendit sur un tiers du ciel. Il est certain qu'il s'agissait alors d'un astre très impressionnant, d'une très grosse comète unique qui se divisa à l'occasion de ce passage dans la banlieue solaire en deux fragments, observation capitale rapportée par l'historien grec Ephorus (IV^e siècle avant J.-C.) (24). C'était le premier acte d'une fragmentation due principalement aux forces de marée solaire, prélude à un véritable émiettement ultérieur.

Dès 1880, Daniel Kirkwood (1814-1895), l'un des spécialistes de mécanique céleste de l'époque, suggéra que la Grande comète de Mars 1843 (1843 I) et la Grande comète australe de 1880 (1880 I) pouvaient être associées avec la comète de -371, du fait de la similarité du mouvement. On sait que la comète 1843 I passa à seulement 0,0055 UA (soit 820 000 km) du Soleil, sur une orbite inclinée à 144,4°, donc rétrograde, et la comète 1880 I à 0,0055 UA également, avec $i = 144,7^\circ$. La parenté de ces deux comètes ne faisait aucun doute. Les considérer comme des "descendantes" de la comète d'Aristote était plus hardi, mais cette hypothèse de Kirkwood a été largement confirmée par tous les travaux ultérieurs sur le sujet.

En 1882, deux nouvelles comètes, la comète Tewfik (1882 I) et la Grande comète de Septembre (1882 II), qui atteignit l'incroyable magnitude de -15, passèrent elles aussi très près du Soleil avec des inclinaisons similaires ($i = 142-144^\circ$). Cinq ans plus tard, une troisième comète, la Grande comète australe de 1887 (1887 I) les suivit avec un parcours analogue. C'était donc un véritable chapelet de comètes qui revenaient au périhélie, à proximité immédiate du Soleil, vestiges de la comète mère d'Aristote.

On doit à l'astronome allemand Heinrich Kreutz (1854-1907) d'avoir montré que les quatre comètes des années 1880 avaient des orbites similaires et

qu'elles descendaient directement de la comète de 1106, elle-même fragment de la comète d'Aristote à son 4^e passage près du Soleil. Cette comète de 1106 avait $P = 370$ ans environ et $a = 51,5$ UA environ, donc un demi-grand axe à l'intérieur de la ceinture de Kuiper (bien qu'elle n'en soit pas originaire). C'est lui qui donna son nom à ce groupe de comètes, véritables Sun-grazers : *le groupe de Kreutz*. Il convient de noter que ce groupe est en fait une véritable *famille*, puisque tous ses membres ont un progéniteur commun. Kreutz identifia également les comètes de 1668 et de 1695 comme faisant partie de ce groupe. A la fin du XIX^e siècle, on connaissait donc neuf membres du groupe de Kreutz, fragments de la comète d'Aristote.

Au cours du XX^e siècle, de nombreux nouveaux membres du groupe ont été identifiés (25), comètes du Toit (1945 VII), Pereyra (1963 V), la fameuse comète Ikeya-Seki (1965 VIII) qui atteignit la magnitude -10 et White-Ortiz-Bolelli (1970 VI), toutes sur des orbites similaires facilement identifiables. De plus, entre 1979 et 1984, six comètes non observées de la Terre furent enregistrées par le satellite *Solwind*, faisant partie de la même famille. Toutes heurtèrent le Soleil qui récupère souvent une petite partie du monde dont il a la charge.

Mais l'histoire ne s'arrête pas là. Entre 1987 et 1989, dix nouveaux fragments, qui heurtèrent eux aussi pour la plupart le Soleil, furent repérés par le satellite *SMM*. Ces comètes non observées reçurent les désignations Solwind 1 à 6 et SMM 1 à 10. Ensuite, entre 1996 et 1998, une trentaine de nouveaux fragments du même groupe ont été repérés (26) très près du Soleil par le satellite *SOHO*, destiné principalement à l'étude de notre étoile, mais capable aussi, accessoirement, d'annoncer des impacts minuscules à sa surface. Depuis, ce sont plus d'un millier de fragments qui ont été repérés par *SOHO* qui s'est avéré un surveillant du ciel extraordinairement efficace.

Il semble bien que ce soient des dizaines de milliers de fragments minuscules qui ont été successivement engendrés par les résidus principaux de la comète mère, qui devait être un astre d'envergure, d'un diamètre centauren (plusieurs centaines de km).

La généalogie complète de cette grande famille de comètes a été recherchée par Brian Marsden, le spécialiste bien connu du calcul des orbites et auteur du catalogue général des comètes. Il a montré que les comètes du groupe de Kreutz se rangent aujourd'hui en deux sous-groupes principaux. Il apparaît clairement que le progéniteur de tous ces résidus cométaires est bien la comète de -371 , et que la majorité des fragments connus sont directement issus de la comète de 1106. Celle-ci s'est fragmentée depuis en plusieurs morceaux de tailles inégales, certains de ceux-ci s'étant eux-mêmes fragmentés à leur tour. Marsden a montré que les comètes de 1843, 1880, 1882 I et 1887 qui se sont succédé en moins d'un demi-siècle sont des fragments de la comète fantôme (non observée mais bien réelle) de 1487, qui s'est scindée en au moins quatre gros blocs, notamment la Grande comète de Septembre 1882 qui a atteint la magnitude -15 et qui était encore elle-même une comète d'un diamètre appréciable.

La comète 1882 II s'est scindée en quatre fragments, celle de 1965 (Ikeya-Seki) en trois fragments. On assiste donc à un véritable émiettement progressif. Certains fragments reviendront encore près du Soleil, d'autres l'ont déjà heurté et n'existent plus, d'autres encore se sont littéralement désintégrés et sont redevenus poussière cosmique. L'exemple du groupe de Kreutz est extrêmement instructif et montre clairement la réalité et l'importance de ce problème de fragmentation et d'émiettement et celui des comètes apparentées, c'est-à-dire issues d'un *progéniteur unique*, parfois d'un gros diamètre comme c'était le cas pour la comète d'Aristote.

D'où venait-elle : nuage de Oort ou ceinture de Kuiper ? Probablement du nuage de Oort, compte tenu de l'inclinaison rétrograde de 145° ($180 - 145 = 35^\circ$). Elle semble, dès le début, avoir dû subir une fragmentation du fait d'une cohésion physique insuffisante des glaces et des poussières la composant. La comète d'Aristote et ses innombrables débris sont uniquement composés de matière fragile et elle s'est quasiment désintégrée en moins de 2500 ans et quelques passages à proximité du Soleil. Il est quasiment certain que d'ici quelques millénaires, il ne restera *rien* de la fameuse comète d'Aristote. Tout redevient poussière, parfois à une vitesse accélérée pour les comètes, surtout si elles viennent frôler le Soleil.

La fragmentation du centaure Hephaistos

Je vais étudier maintenant un autre cas de fragmentation, mais très différent de celui que nous venons de voir qui concernait une comète de glace venant du nuage de Oort. Hephaistos, lui, était un objet de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre au minimum, issu de la ceinture de Kuiper, de composition mixte, c'est-à-dire à la fois comète et astéroïde, qui a certainement subi l'étape centaure, une étape intermédiaire et très provisoire de quelques millions d'années tout au plus, avant de venir se faire piéger dans le Système solaire intérieur où ses jours en tant qu'objet unique étaient comptés. Ce n'est qu'à partir du début des années 1990 qu'on a pu saisir les diverses étapes de la vie de tels objets.

On connaît des objets avec une excentricité très forte ($e > 0,70$) (27) connus ou soupçonnés être des fragments et résidus de ce progéniteur dont la capture ne peut excéder quelques millions d'années et la fragmentation *initiale* quelques centaines de milliers d'années, c'est-à-dire une durée insignifiante à l'échelle astronomique. L'émiettement se poursuit encore de nos jours et entraîne une dispersion des éléments orbitaux, notamment les valeurs des nœuds ascendants, des arguments et longitudes des périhélie qui s'écartent les uns des autres à une vitesse de 4 degrés par millénaire (1 degré tous les 250 ans en moyenne) et qui finiront par prendre toutes les valeurs possibles entre 0 et 360 degrés.

L'existence de deux groupes principaux est apparue clairement au fur et à mesure des découvertes. Ils sont issus d'une rupture globale récente, mais on peut aussi mettre en évidence des dislocations ultérieures (l'émiettement permanent). On peut ainsi "reconstituer" des objets intermédiaires qui

existaient encore il y a quelques dizaines de milliers d'années et même quelques milliers d'années pour certains d'entre eux, c'est-à-dire quelques petites "secondes" à l'échelle astronomique.

Au début des années 1980, les astronomes ont compris que des objets qui *paraissaient* très différents comme la comète périodique P/Encke, nommée d'après l'astronome allemand Johann Encke (1791-1865), et l'astéroïde Oljato ne formaient en fait qu'un seul objet il y a seulement 9500 ans, vers -7500. Dès 1978, Lubor Kresak (1927-1994) avait envisagé une parenté entre P/Encke et l'objet de la Toungouska qui a heurté la Terre en 1908. En octobre 1978, peu après sa découverte par Ludmila Chernykh, l'astéroïde 1978 SB (baptisé plus tard Hephaistos) attira l'attention des spécialistes du fait d'éléments orbitaux caractéristiques (a , e et i) identiques pratiquement à ceux de P/Encke, mais tout de suite se posa le problème des diamètres. En 1980, sur ce point important qui a fait douter les spécialistes sur l'origine commune aujourd'hui quasiment admise par tous, j'écrivais ceci :

" Cette ressemblance frappante des éléments orbitaux a fait émettre l'hypothèse, par certains astronomes, que les deux objets seraient *deux fragments d'une ancienne comète brisée* lors d'un passage près du Soleil. Mais cela est plus que douteux pour la raison suivante : il se trouve que le g de 1978 SB est relativement élevé (15,2), ce qui correspond à un diamètre voisin de 7,2 km pour un astéroïde *cométaire*. Au contraire, le noyau solide (non sublimable) de P/ Encke est probablement inférieur à 1,5 km de diamètre. En bonne logique, P/Encke aurait dû brûler ses derniers éléments volatils au moins 2000 ou 3000 ans avant 1978 SB et devenir un astéroïde *avant* lui. Or, c'est l'inverse que l'on observe, puisque P/Encke est encore une comète *active* pour 100 ou 200 ans, alors que 1978 SB ne présente aucune activité cométaire suspecte et n'est plus sujet aux forces non gravitationnelles qui sont caractéristiques des comètes dont le noyau est encore actif. Il est pratiquement certain que 1978 SB a été injecté dans le Système solaire proche longtemps avant P/Encke, et donc l'hypothèse d'une origine *commune* pour ces deux objets est fautive. La similitude des deux orbites, bien que très frappante, est un argument tout à fait insuffisant pour conclure à la fragmentation d'un objet unique. " (28)

Comme quoi la "vérité" d'un jour n'est pas forcément celle du lendemain ! Aujourd'hui, au contraire, la parenté étroite entre ces deux objets ne fait plus guère de doute. Reste à résoudre la question : pourquoi P/Encke est-elle encore une comète active et Hephaistos déjà un astéroïde cométaire ? Il est obligatoire de trouver une solution satisfaisante à ce problème. Les spécialistes dans leur majorité (29) optent maintenant pour l'idée suivante : le fragment P/Encke qui a préservé certains éléments volatils a été en sommeil durant plusieurs millénaires et n'est de nouveau actif que depuis peu de temps. Il ne se serait "réveillé" que quelques dizaines d'années avant

sa découverte au XVIII^e siècle. Il paraît impossible en effet qu'il ait été actif en permanence depuis l'Antiquité. Découvert seulement dans les années 2100, P/Encke aurait été cataloguée directement comme un astéroïde comme l'est son frère jumeau Oljato, qui a peut-être lui aussi eu des *sursauts* cométaires durant les siècles passés, mais qui semble aujourd'hui définitivement "éteint" et privé de toute matière encore susceptible de se sublimer et donc de présenter un caractère cométaire.

Comme possible membre de la famille Hephaistos, on connaît la comète à courte période D/Helfenzrieder qui a été découverte en 1766 par Johann Helfenzrieder (1724-1803), mais qui n'a pas été réobservée depuis. Qu'est devenue cette comète ? S'est-elle totalement désintégrée ? Survit-elle sous la forme d'un astéroïde minuscule que l'on découvrira peut-être un jour ? A-t-elle bénéficié à l'époque d'un sursaut exceptionnel de courte durée qui a permis sa découverte ? Autant de questions qui restent sans réponse, mais la parenté avec les astéroïdes de la famille reste possible.

Notons encore, pour terminer avec le problème de la désintégration des comètes, que quasiment chaque fragment volumineux engendre à son tour une famille de météores associés. Comme je le montrerai dans le chapitre qui leur est consacré, plusieurs essaims sont liés génétiquement aux fragments de Hephaistos, et notamment celui très important connu sous le nom de *Complexe des Taurides*, qui est associé à P/Encke et qui comporte encore des objets de taille substantielle (hectométrique). L'objet de la Toungouska était probablement l'un d'eux.

La famille Hephaistos

Une famille mi-cométaire/mi-planétaire

La famille Hephaistos est appelée à grossir ces prochaines années, puisqu'on découvre des nouveaux membres régulièrement. Un seul de ses composants est une comète active : P/Encke. D/Helfenzrieder n'est connue que d'après son passage de 1766 et qu'elle n'existe plus (tout au moins en tant que comète active). Son appartenance réelle à la famille Hephaistos n'est d'ailleurs pas prouvée, elle est seulement possible.

Tous les autres objets recensés le sont comme astéroïdes puisqu'ils n'ont plus actuellement d'activité cométaire perceptible. La plupart sont des *astéroïdes cométaires*, c'est-à-dire qu'ils ont été actifs à une certaine période de leur vie d'astres indépendants. Quelques-uns, par contre, n'ont peut-être jamais eu d'activité cométaire et sont de vrais astéroïdes. C'est le paradoxe de ces gros objets venus de la ceinture de Kuiper qui ont une composition hétérogène et qui sont à la fois des comètes et des astéroïdes. Certaines parties sont composées de glace, capables après fragmentation de se sublimer et de présenter provisoirement une activité de type cométaire, d'autres parties sont rocheuses et donc astéroïdales. On retrouve donc cette double composition dans les débris. Hephaistos est une famille mixte, mi-cométaire et mi-planétaire.

Tous les objets de la famille ont une très forte excentricité (voisine de 0,80 et toujours supérieure à 0,60) et une faible inclinaison (comprise entre 0 et 13°), mais avec des différences qui deviennent sensibles avec le temps qui passe et les perturbations parfois sévères que certains débris peuvent subir à l'occasion d'approches serrées aux planètes. Il faut aussi se rappeler que certains fragments ont subi des perturbations de type non gravitationnel, alors qu'ils étaient encore actifs, qui les ont éloignés des éléments types qui étaient ceux de l'objet primitif Hephaistos avant sa première fragmentation.

Car il est certain, comme c'est le cas pour les comètes du groupe de Kreutz, que la fragmentation s'est constamment répétée, chaque morceau devenu autonome générant à son tour de nouveaux fragments plus petits et une infinité de poussières. Pour ce qui est du demi-grand axe (et de la période), les écarts sont plus importants, certains fragments s'étant retrouvés sur des orbites plus petites à la suite de l'accélération du mouvement subie à l'occasion de fortes approches aux planètes. On peut penser qu'une valeur assez proche de 2,17-2,20 UA (qui est celle de Hephaistos, Oljato et P/Encke) était la valeur de base, mais on constate que certains fragments ne font plus partie de l'anneau principal des astéroïdes (2,08-3,58 UA) et circulent en moyenne entre Mars et l'anneau principal. Il n'y a pas lieu de s'en étonner, et cela ne doit pas masquer une origine commune probable.

Les deux objets connus les plus importants de la grande famille Hephaistos (le progéniteur cométaire) sont Hephaistos (l'astéroïde) et Heracles qui ont tous les deux $H = 13,9$ correspondant à un diamètre moyen de l'ordre de 7 à 10 km selon l'albédo. Ce sont donc des "gros NEA", capables de causer des dégâts tout à fait considérables s'ils viennent percuter la Terre dans l'avenir.

Cela montre bien que le centaure progéniteur de la famille Hephaistos était un gros objet, de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre au minimum, mais qui pouvait peut-être atteindre ou dépasser en fait 100 km, comme c'est le cas pour Chiron, Pholus et de nombreux autres objets connus de la ceinture de Kuiper. Cette réalité incroyable a été une révélation pour tous ceux qui se sont penchés sur la menace réelle que présentent les astéroïdes et les comètes pour la Terre et l'humanité qu'elle abrite. En 2007, il est apparu que le *Younger Dryas Event*, daté d'environ -11950, était associé à l'impact d'une comète importante, peut-être un fragment majeur de Hephaistos. Les conséquences humaines de ce drame cosmique ont été incalculables, totalement sous-estimées encore aujourd'hui. Mais le débat est lancé et réserve des surprises.

Plusieurs fois par million d'années, des nouveaux objets sont transférés dans le Système solaire intérieur. Leurs fragments ultérieurs renouvellent le stock des objets susceptibles de heurter une des planètes, ou l'un de leurs satellites, dans les millions d'années qui suivent ce transfert. Cette révélation, bien établie du fait de la découverte de nombreux centaures, est capitale pour comprendre la place tenue par le catastrophisme d'origine cosmique dans l'évolution des espèces, par le biais des extinctions et de l'évolution. Je parlerai en détail de ce problème essentiel au chapitre 15.

Une fragmentation obligatoirement récente

La question que l'on se pose est celle-ci : " *Depuis quand a commencé la fragmentation de Hephaistos ?* " Et une autre vient immédiatement après : " *Peut-on dater approximativement la fragmentation des différents objets actuellement recensés ?* " Bien sûr, il est exclu de répondre avec précision à ces deux questions puisqu'on ignore les perturbations gravitationnelles et aussi non gravitationnelles qu'ils ont subi, mais on peut avoir un ordre de grandeur intéressant. Celui-ci se chiffre seulement en dizaines de milliers d'années pour la première question, et en milliers d'années pour les fragmentations les plus récentes, comme nous allons le voir.

On ne sait pas quand Hephaistos a été définitivement injecté dans le Système solaire intérieur, suite à des perturbations catastrophiques dues à l'une des quatre grosses planètes externes (Neptune, Uranus, Saturne ou Jupiter). Cet événement peut remonter à plus de 100 000 ans. Mais le début de la fragmentation a pu être sensiblement plus tardif et remonter à seulement quelques dizaines de milliers d'années. On pense qu'elle doit être liée à une très forte approche à l'une des trois planètes intérieures : Mercure, Vénus ou même la Terre. En tout cas, il s'agit d'un événement très récent à l'échelle astronomique.

Un détail intrigue les astronomes : de nombreux fragments peuvent s'approcher très près de Mercure (c'est encore le cas de P/Encke et surtout de Hephaistos notamment), ce qui est assez rare quand même en général pour les astéroïdes et les comètes. Cela a-t-il un rapport possible avec la fracture initiale ou est-ce pure coïncidence ? En règle générale, les astronomes n'aiment pas trop les coïncidences, surtout si elles se répètent de façon anormale. Se pourrait-il que ce soit *une approche rasante à Mercure* qui ait fait exploser Hephaistos ? Et en accélérant fortement son mouvement, diminuer d'une manière drastique la période de révolution ? Celle-ci est anormalement faible pour une comète, puisque l'aphélie de P/Encke et celui des autres fragments devenus astéroïdaux sont largement inférieurs au demi-grand axe de Jupiter. On sait que les comètes de la famille de Jupiter ont quasiment toutes leur aphélie à l'extérieur de l'orbite de la planète géante. Il s'est donc passé pour Hephaistos un événement unique (non encore identifié) qui a permis une réduction très importante des valeurs de l'aphélie et du demi-grand axe. Par contre, le périhélie n'aurait pas beaucoup évolué. Ce détail laisse à penser que *le cataclysme responsable a eu lieu près du Soleil*.

Une dispersion des éléments inexorable

On considère qu'en moyenne la dispersion des longitudes du périhélie s'effectue à raison de 4° par millénaire, soit en gros 1° tous les 250 ans. Donc, pour les 360° de la sphère céleste, le processus complet demande environ 90 000 ans, pour 180° 45 000 ans, et pour 90° 22 500 ans. On a une indication sur les fractures successives des différents fragments. Certains groupements serrés (moins de 20°) pourraient signifier une rupture

datant de 5000 ans seulement. Les calculs ont montré que P/Encke et Oljato dont les périhélie diffèrent de seulement 12° formaient encore un seul astre il y a 9500 ans (soit vers -7500). Mais la dispersion des autres éléments orbitaux montre que leur histoire ultérieure (surtout celle d'Oljato d'ailleurs) a été *très agitée*, et que Jupiter y a joué un rôle prépondérant.

En règle générale, l'espérance de vie de tous ces fragments est très faible. Vont-ils heurter une des quatre planètes intérieures, être expulsés ou s'émietter encore ? Je montrerai au chapitre 19 que certains fragments ont déjà probablement heurté la Terre durant la protohistoire et l'Antiquité.

Deux groupes principaux

De tous les éléments actuellement connus concernant la famille Hephaistos, il ressort plusieurs choses importantes à signaler. D'abord et surtout, il existe deux *groupes* principaux : *Encke* et *Hephaistos*.

Hephaistos est un groupe contenant plusieurs membres avec π compris entre 216 et 255°, soit une dispersion de 39°. Celle-ci, à la vitesse moyenne de 4° par millénaire, a pu s'effectuer en 10 000 ans seulement. Hephaistos est le fragment majeur. Ce groupe contient aussi plusieurs autres objets importants non retenus ici (car ils ont $e < 0,70$), comme 1990 TG₁ et Mithra.

Encke est le groupe principal qui comprend plusieurs objets avec π compris entre 122 et 189°, soit une dispersion de 67° qui a pu s'accomplir en 17 000 ans. Il a été victime de multiples fragmentations plus récentes. Notamment, trois objets : P/Encke, Oljato et Heracles ont leurs π regroupés en 16°, dispersion correspondant à une période de 4000 ans seulement. Le fragment majeur de ce groupe est Heracles. 1982 TA, Jason et Oljato sont également des fragments importants. A noter, parallèlement, l'existence d'un fragment minuscule, 1993 KA₂, qui ne dépasse pas 10 mètres de diamètre moyen, mais qui a pu être identifié lors d'une très forte approche à la Terre (30).

D'autres NEA sont isolés et n'appartiennent pas à l'un des deux groupes actuellement recensés, mais au fur et à mesure que l'on découvrira de nouveaux membres de la famille, on pourra probablement mettre en évidence des parentés encore plus récentes. Ainsi, on sait déjà qu'Adonis et 1995 CS sont deux fragments d'un seul NEA cassé il y a moins de 2000 ans (31). Ils sont associés à un essaim météorique issu également de cette fragmentation.

Il est important de noter l'existence de nombreux objets de taille hectométrique et décamétrique parmi les fragments déjà identifiés de Hephaistos. Cela signifie évidemment que des milliers d'autres fragments minuscules restent à découvrir. Il s'agit d'une véritable mitraille cosmique issue de fragmentations successives, et aussi d'un émiettement qui se poursuivra encore pendant plusieurs milliers ou même dizaines de milliers d'années, à partir du moment où le progéniteur de base n'était pas uniquement formé de glace, mais aussi de roches plus résistantes. Cette

mitraille existe encore, principalement sous forme microscopique mais pas uniquement, dans les différents essaims associés aux débris des principaux fragments, notamment dans le *Complexe des Taurides* associé, lui, directement à P/Encke.

Des approches suspectes aux planètes

Les trois planètes intérieures : Mercure, Vénus et la Terre sont frôlées par de nombreux fragments de Hephaistos. Certains objets sont en mesure de frôler deux ou même dans certains cas les trois planètes, et donc leur espérance de vie est très faible, souvent inférieure à 1 million d'années, ce qui est insignifiant à l'échelle astronomique. Hephaistos frôle l'orbite de Mercure (à 0,007 UA) et P/Encke également (à 0,022 UA). Cette double possibilité assez suspecte laisse à penser que la première planète a pu avoir été *responsable de la fracture initiale* du progéniteur de la famille, à la suite d'une approche rasante et de forces de marée insupportables pour un corps céleste à la configuration structurale de mauvaise qualité.

Certaines collisions futures paraissent d'ores et déjà inévitables à moyen terme, poursuite d'un processus qui existe en fait depuis quelques milliers d'années, et appelé à se poursuivre encore sur peut-être plusieurs centaines de milliers d'années. L'émiettement pourrait en être seulement à une phase intermédiaire, puisque de nombreux fragments connus et à découvrir sont incontestablement de taille kilométrique. Avant que tous ces fragments soient redevenus poussières, il y aura encore de nombreux impacts et une infinité de météores associés aux divers courants météoriques liés aux résidus de Hephaistos, notamment le fameux *Complexe des Taurides* qui est associé directement à P/Encke.

Il faut bien l'admettre, les astronomes britanniques Victor Clube et Bill Napier ont apporté du neuf avec leur hypothèse d'une comète géante éclatée dans le Système solaire intérieur et donc dans l'environnement immédiat de la Terre. C'est probablement la réalité, mais une réalité difficile à cerner et qui ne se laisse appréhender que pièce par pièce.

La comète la plus dangereuse : P/Swift-Tuttle

La comète 109P/Swift-Tuttle (32) a la particularité d'être l'objet connu d'envergure le plus menaçant pour la Terre dans les quelques siècles à venir et il est donc nécessaire de préciser certains points la concernant.

L'histoire d'une comète imprévisible

P/Swift-Tuttle a été découverte le 16 juillet 1862, avec une magnitude 7,5, par Lewis Swift (1820-1913) et, indépendamment le 19 juillet, par Horace Tuttle (1837-1923), deux astronomes américains. Elle reçut la désignation officielle 1862 III. Très spectaculaire tout l'été 1862, elle atteignit la magnitude 2 début septembre, avec une queue de 25 à 30°, avant de décliner rapidement et de disparaître définitivement le 31 octobre. Quatre

ans plus tard, Giovanni Schiaparelli (1835-1910) démontra que le fameux essaim météorique des *Perséides* est associé à cette comète, ce qui signifie qu'elle est en mesure, parfois, de passer très près de la Terre.

Plusieurs spécialistes de l'époque calculèrent l'orbite de P/Swift-Tuttle qui s'avéra être rétrograde. Sa période était de l'ordre de 120 ans, avec un périhélie à 0,96 UA, une excentricité voisine de 0,96 et une inclinaison de 114°. Son prochain retour était donc attendu pour le début des années 1980.

En 1973, Brian Marsden reprit toutes les données concernant cette comète (33) pour préparer son prochain passage. Pas moins de 440 observations étaient utilisables. Il rechercha parmi les comètes anciennes celles qui pouvaient correspondre à d'anciens passages de P/Swift-Tuttle. Il retint comme candidat possible la comète Kegler 1737 II, observée en Chine du 2 au 16 juillet 1737. Pour que cette liaison fût possible, il était nécessaire d'envisager des forces non gravitationnelles exceptionnelles, forces, on le sait, dues à l'activité propre du noyau. Cette identification, seulement possible en 1973, conduisait à une période de révolution nettement supérieure à celle envisagée : 130 ans au lieu de 120. Dix ans d'écart, c'est beaucoup, aussi l'identification restait alors très incertaine, pour ne pas dire improbable.

Marsden postulait pour des passages antérieurs en 1610 (à l'époque de Kepler et Galilée), 1479, 1348, et 1213 et beaucoup plus anciennement en 188 et -68, ces deux années correspondant à des observations de comètes qui pouvaient correspondre à Swift-Tuttle, ce qui n'était pas le cas pour les quatre autres, pour lesquelles aucune comète connue avec une orbite analogue n'avait été signalée. D'autre part, seule l'approche de 188 était inférieure à 0,2 UA, les approches ultérieures étant supérieures à 0,50 UA, jusqu'à celle de 1862 qui fut égale à 0,34 UA.

Ce n'est que le 26 septembre 1992, alors qu'on ne l'attendait plus, que Tsuruhiko Kiuchi, un amateur japonais, retrouva la comète avec une magnitude de 11,5, alors qu'elle était circumpolaire dans la Grande Ourse.

L'importance des jets cométaires et les forces non gravitationnelles

En 1981, l'expert américain Zdenek Sekanina (34) étudia les nombreux dessins effectués en 1862 pour déterminer la rotation du noyau et pour analyser la nature des diverses structures observées par les spécialistes de l'époque, notamment les fameux jets associés aux *zones actives*. La période de rotation du noyau fut établie à 2,77 jours et huit zones actives différentes furent repérées, cause de perturbations non gravitationnelles sans cesse variables et donc imprévisibles à moyen terme.

Par contre, pour l'approche de 1992, pour laquelle la comète ne s'approchait pas à moins de 1,1 UA de la Terre, les spécialistes, pourtant beaucoup

mieux équipés que leurs prédécesseurs du siècle dernier, n'ont décelé que deux jets : un fort, très spectaculaire et un faible (35).

De nombreuses observations ont confirmé que les noyaux cométaires sont des corps très hétérogènes dans lesquels des régions très sombres (albédo 0,02 à 0,05) côtoient des zones plus brillantes et *actives*, appelées parfois *plages*, souvent très petites, d'où sont émis d'une façon irrégulière des gaz et des poussières. Les zones sombres, elles, ne sont jamais actives.

On comprend beaucoup mieux maintenant le principe des comètes en sommeil : les gaz et les poussières ne peuvent s'échapper que des plages actives, ceux existant sous les régions sombres, protégés par une croûte (d'abord peu épaisse mais qui peut devenir progressivement une véritable carapace) de silicates, peuvent rester bloqués des milliers d'années. C'est ce qui a dû se produire pour P/Encke, redevenue active il y a quelques siècles seulement, probablement à la suite d'un impact dans l'espace.

Les forces non gravitationnelles sont également mieux comprises. On sait qu'à long terme elles sont obligatoirement éphémères, mais on sait aussi qu'à court terme elles sont épisodiques, cessant dès que la comète s'éloigne à plusieurs unités astronomiques du Soleil. Pour les comètes à longue période, le processus de dégazage complet doit se poursuivre sur une période se chiffrant en millions d'années, et non en milliers comme c'est le cas pour les petites comètes à courte période.

Le futur d'une comète à risque

L'importance des forces non gravitationnelles de la comète P/Swift-Tuttle est compatible avec un noyau solide de l'ordre de 5 km, ce qui n'est pas négligeable, même si l'on est loin des 40 km de Hale-Bopp, diamètre au demeurant rarissime pour les comètes connues.

C'est au niveau des apparitions futures que P/Swift-Tuttle trouve son intérêt. Marsden a calculé une très forte approche pour le mois d'août 2126, lors du prochain passage. Compte tenu de l'irrégularité et de l'importance des forces non gravitationnelles, il est exclu de toute manière de prévoir les circonstances précises de l'approche de 2126. On a parlé, prématurément, d'un impact *possible* qui n'aura pas lieu. Ce qui est sûr c'est que cette comète pourrait s'avérer très dangereuse au cours des siècles prochains.

Cette approche serrée d'une grande comète spectaculaire le siècle prochain fait déjà fantasmer les prophètes et charlatans de tout poil qui attendent depuis longtemps l'objet cosmique capable d'engendrer le jugement dernier annoncé dans l'Apocalypse. On imagine : une comète de 5 km avec une vitesse de 60 km/s ! Avec une densité de 1,0, cela fait une énergie d'impact de $1,2 \times 10^{23}$ joules, une superbe fin du monde annoncée. Du papier à vendre en perspective, des gogos à terroriser.

Pour désamorcer cette pseudo-fin du monde cométaire, je reparlerai de P/Swift-Tuttle au chapitre 17 consacré aux fausses pistes. En effet, il ne faut pas confondre approche très serrée, et même orbite de collision, avec impact obligatoire. Ce n'est pas la même chose. Il est heureux que personne n'ait prévu, en 1983, l'approche très serrée de C/IRAS-Araki-Alcock, une comète de 6 km de diamètre. Ç'eût été une panique digne du Moyen Age.

L'énergie d'impact des comètes

L'énergie d'impact des comètes diffère de celle des astéroïdes sur trois points différents :

→ *les vitesses*. La vitesse moyenne retenue pour les impacts cométaires est supérieure : 30 km/s au lieu de 20 km/s pour les astéroïdes, sans perdre de vue d'ailleurs que les vitesses concernant les orbites rétrogrades doivent être doublées (60 km/s), ce qui entraîne alors une énergie multiplié par 4.

→ *les densités*. Les densités cométaires sont incontestablement plus faibles que celles des astéroïdes. On retient généralement quatre densités typiques pour les noyaux cométaires : 0,1, 0,5, 1,0 et 2,0. On sait que ces noyaux sont souvent de nature hétéroclite (glace et roches notamment), poreux parfois et en général de configuration structurale de qualité médiocre, particularité qui débouche sur la fragmentation ou la désintégration.

→ *les diamètres*. Il apparaît clairement que certaines comètes peuvent avoir un diamètre sensiblement supérieur à ceux des astéroïdes qui s'approchent de la Terre. Un astéroïde cométaire comme Hidalgo frôle les 50 km et certains centaures, objets mixtes, dépassent à coup sûr les 100 km de diamètre moyen. A l'échelle astronomique, un impact avec un objet d'un tel diamètre n'est nullement invraisemblable. Les grands bassins d'impact sur certaines planètes et plusieurs gros satellites montrent que de tels impacts ont déjà eu lieu à plusieurs reprises. Une comète de densité 1,0 de 1 km de diamètre a une énergie de $2,4 \times 10^{20}$ joules. Une autre comète de 5 km a une énergie de $2,9 \times 10^{22}$ joules.

Quelques conséquences d'impacts cométaires sont à rappeler. D'abord ceux concernant des comètes *actives* sont beaucoup plus rares que ceux des astéroïdes cométaires. Par contre, ceux-ci débarrassés des éléments volatils après dégazage sont plus denses. S'ils sont des fragments *rocheux* d'objets mixtes, cette densité peut être quasiment astéroïdale : 2,5 et même 3,5 dans certains cas. Les objets de densité 0,1, 0,5 et même 1,0 n'ont pas la cohésion suffisante pour heurter la *surface* terrestre, pour eux la désintégration est quasi certaine.

Enfin, qu'est-ce qui différencie un impact d'astéroïde de celui d'une comète ? En quelques mots, on peut dire que ceux concernant ces dernières ont des vitesses supérieures, des densités plus faibles, des diamètres plus gros, une fréquence plus rare, débouchent davantage sur une désintégration et qu'ils enrichissent donc davantage la matière cosmique de gaz et de poussières.

La Terre subit indifféremment les deux types de collisions depuis plusieurs milliards d'années déjà, avec des conséquences que j'étudierai dans des chapitres ultérieurs de ce livre. Au niveau de la Terre elle-même, tous les impacts courants concernant des astres de taille kilométrique sont de simples pichenettes (36), sans conséquences sérieuses. Au niveau de la vie, il en va autrement, *l'impactisme étant l'un des moteurs de l'évolution*.

Cette réalité de l'importance des comètes dans l'apparition de la vie, dans la possibilité d'une panspermie microbienne, dans les extinctions aussi est prise en compte depuis quelques années par des chercheurs de multiples spécialités. De nombreux livres ont été publiés sur le sujet, certains sont remarquablement intéressants (37/38/39/40). Les comètes sont un sujet inépuisable, plein de surprises à venir.

Notes

1. D.K. Yeomans, *Comets. A chronological history of observation, science, myth, and folklore* (John Wiley & Sons, 1991).
2. M. Festou, Ph. Véron et J.-C. Ribes, *Les comètes, mythes et réalités* (Flammarion, 1985).
3. J.-M. Homet, *Le retour de la comète* (Imago, 1985 ; préface de M. Vovelle).
4. *Le retour de la comète*, op. cit., citation p. 16.
5. L.L. Wilkening (ed.), *Comets* (University of Arizona Press, 1982). Le livre de référence dans les années 1980.
6. J. Crovisier et Th. Encrenaz, *Les comètes. Témoins de la naissance du Système solaire* (Belin - CNRS Editions, 1995 ; préface de R.-M. Bonnet).
7. J.-C. Merlin et M. Verdenet, *Les comètes* (Tessier & Ashpool, 1995). Un très bon livre écrit par deux astronomes amateurs français très compétents.
8. Dans les *hydrates*, les molécules d'eau sont piégées dans une structure cristalline, alors que dans les *clathrates*, les composants sont piégés dans des cavités situées dans la structure d'un autre composant (exemple : le méthane piégé dans la glace d'eau).
9. T.I. Gombosi and H. Houpis, *An icy-glue model of cometary nuclei*, *Nature*, 324, pp. 43-46, 1986.
10. Ph. Rousselot, *Les comètes de l'Antiquité à l'ère post-Halley* (Broquet, 1996).
11. M.-A. Combes et J. Meeus, *Les fortes approches des comètes à la Terre*, *L'Astronomie*, 110, pp. 254-261, 1996.

12. G.W. Kronk, *Comets : a descriptive catalog* (Enslow Publishers, 1984). Ce livre contient les conditions de découverte et la description de plus de 650 comètes depuis l'Antiquité jusqu'à 1982. Un document indispensable pour avoir des renseignements précis sur les comètes du passé, qui compile d'autres documents plus anciens du même type.
13. F. Arago, *Les comètes* (1858). Le classique d'Arago qui a été réédité en fac-similé par la librairie Blanchard en 1986.
14. P. Maffei, *La comète de Halley. Une révolution scientifique* (Fayard, 1985). Titre original : *La cometa di Halley* (1984). Un livre totalement consacré à l'histoire de la comète de Halley, écrit par l'astrophysicien italien Paolo Maffei.
15. C. Sagan et A. Druyan, *Comète* (Calmann-Lévy, 1985). Titre original : *Comet* (1985). Un classique superbement illustré écrit à l'occasion du retour de P/Halley.
16. E.J. Öpik, *Interplanetary encounters. Close-range gravitational interactions* (Elsevier, 1976).
17. B.G. Marsden and G.V. Williams, *Catalogue of cometary orbits* (Minor Planet Center, 2005). C'est la 16^e édition du catalogue "officiel" des orbites cométaires, qui est constamment mis à jour. Il référence 3031 orbites et un total de 2991 apparitions pour 2221 comètes différentes connues à la mi-août 2005.
18. E. Everhart, *The origin of short-period comets*, *Astrophysical Letters*, 10, pp. 131-135, 1972.
19. M.-A. Combes et J. Meeus, *Les astéroïdes extérieurs à Jupiter*, *L'Astronomie*, 109, pp. 84-92, 1995 et *Nouvelles des astéroïdes extérieurs*, *L'Astronomie*, 110, pp. 228-233, 1996. Les deux premiers articles détaillés en langue française consacrés à ces nouveaux objets déjà banalisés.
20. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 7)*, *Observations et Travaux*, 36, pp. 33-41, 1993. Quatre pages de cet article (pp. 37-41) sont consacrées à Damocles. Une intégration numérique de son mouvement pour la période 1800-2154 montre que les éléments orbitaux varient très peu à court terme. Par contre, à long terme, il suffirait d'une diminution de 8° de l'inclinaison pour que Damocles devienne un objet de type Apollo. Un tel objet de 15 km de diamètre, avec une vitesse d'impact de 40 km/s, aurait une énergie cinétique de l'ordre de $2,8^{24}$ joules et pourrait facilement causer un nouvel hiver d'impact et une extinction de masse.
21. M.-A. Combes et J. Meeus, *Un nouvel astéroïde exceptionnel : 1977 UB (Chiron)*, *L'Astronomie*, 92, pp. 231-235, 1978.

22. A. Stern, *Chiron : Interloper from the Kuiper disk*, *Astronomy*, 22, august 1994. Stern préférerait le qualificatif de "disque" plutôt que "anneau" ou "ceinture" pour les astéroïdes transneptuniens. Mais c'est l'appellation "ceinture de Kuiper" qui s'est imposée au fil des années et qui est adoptée par les spécialistes.

23. Il faut se rappeler qu'Aristote considérait les comètes comme faisant partie du monde sublunaire, c'est-à-dire en fait comme des phénomènes atmosphériques. Son opinion eut malheureusement force de loi jusqu'à ce que Tycho Brahé, en 1577, prouve le contraire.

24. Cette observation rapportée par Ephorus, historien grec du IV^e siècle av. J.-C., contemporain de l'événement, est citée par Sénèque dans ses *Questions naturelles*. Elle avait très étonné les Anciens qui ne croyaient pas possible jusqu'alors la fragmentation d'une comète.

25. Dans leur livre *Les comètes* (note 7), Jean-Claude Merlin et Michel Verdenet donnent l'arbre généalogique détaillé des comètes du groupe de Kreutz (tableau 4.17, p. 259), à partir de la comète d'Aristote de -371.

26. S. Garro, *Activités cométaires*, rubrique de la revue *Pulsar*, disparue aujourd'hui. Les comètes du groupe de Kreutz repérées dans les années 1996-1998 (une trentaine en trois ans) l'ont été par le satellite SOHO. Elles ont donc pris son nom. Aujourd'hui, ce sont plus de 1000 comètes SOHO qui ont été identifiées, la grande majorité étant des résidus minuscules issus de l'émiettement progressif des fragments de la comète d'Aristote.

27. De nombreux autres membres du centaure Hephaistos pourraient avoir vu leur excentricité initiale (voisine de $e = 0,82$) diminuer sérieusement, suite à des perturbations, et se situer actuellement entre 0,60 et 0,70. On connaît dans cette gamme d'excentricités des objets de taille kilométrique comme 4341 Poseidon ($a = 1,84$ UA, $e = 0,68$ et $i = 12^\circ$), 4486 Mithra ($a = 2,20$ UA, $e = 0,66$ et $i = 3^\circ$), 5731 Zeus ($a = 2,26$ UA, $e = 0,65$ et $i = 12^\circ$) et 4183 Cuno ($a = 1,98$ UA, $e = 0,64$ et $i = 7^\circ$).

30. Il n'est pas exclu également que 1991 BA, un objet de 10 mètres qui a frôlé la Terre en 1991 fasse partie du groupe P/Encke. 1991 BA a $a = 2,24$ UA, $e = 0,68$, et $i = 2^\circ$ se trouve déjà sur une orbite de quasi-collision avec la Terre.

31. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 13)*, *Observations et Travaux*, 42, pp. 11-17, 1995. Sur les astéroïdes jumeaux Adonis et 1995 CS, voir pp. 12 et 13.

32. J.-C. Merlin, *L'histoire tumultueuse de la comète P/Swift-Tuttle*, *L'Astronomie*, 107, 146-152, 1993.

33. B.G. Marsden, *The next return of the comet of the Perseid meteors*, *Astronomical Journal*, 78, 7, pp. 654-662, 1973.

34. Z. Sekanina, *Distribution and activity of discrete emissions areas on the nucleus of periodic comet Swift-Tuttle*, *Astronomical Journal*, 86, 11, pp. 1741-1773, 1981.
35. L. Jorda, J. Lecacheux et F. Colas, *Les jets de P/Swift-Tuttle*, *L'Astronomie*, 107, pp. 172-173, 1993.
36. On donne souvent comme comparaison imaginée, la collision d'un moustique avec un gros paquebot pour un impact décamétrique. On voit ainsi le rapport réel des masses en présence.
37. P.J. Thomas, C.F. Chyba and C.P. McKay (editors), *Comets and the origin and evolution of life*, Springer, 1997. Un livre collectif qui prend en compte les comètes pour l'apparition de la vie sur Terre.
38. D. Seargent, *The greatest comets in history*, Springer, 2009. Un livre qui raconte en détail l'histoire des grandes comètes depuis l'Antiquité.
39. M. Mobberley, *Hunting and imaging comets*, Springer, 2011. Pour tout savoir sur la recherche moderne des comètes et aussi sur les découvreurs. Un livre passionnant et magnifiquement illustré.
40. J. Wickramasinghe, C. Wickramasinghe and W. Napier, *Comets and the origin of life*, *World Scientific*, 2010. Chandra Wickramasinghe, l'ancien associé de Fred Hoyle, travaille maintenant avec sa fille Janaki sur le sujet toujours controversé de la panspermie cométaire.

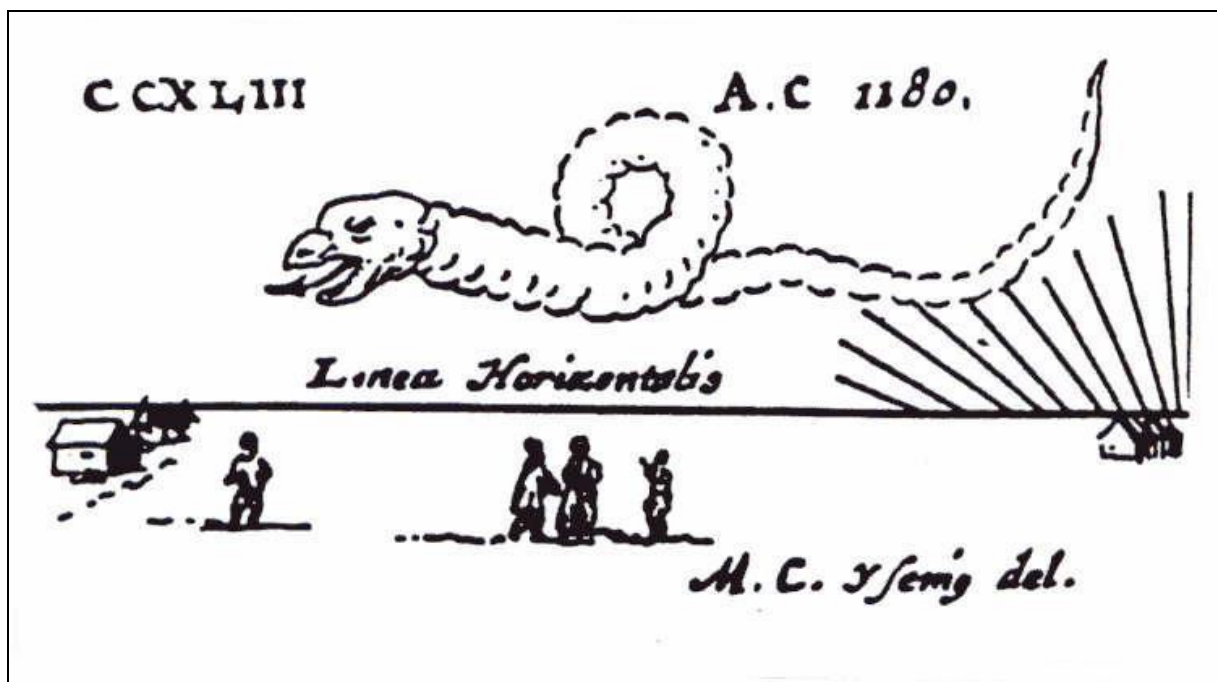


Figure 5. **La comète de 1180 : comète ou démon ?**

CHAPITRE 8

L'IMPACTISME INVISIBLE

Définitions

Ce chapitre est consacré à la troisième forme d'impactisme (avec les formes *macroscopique* et *microscopique*), invisible celui-là, mais bien réel et particulièrement sournois, surtout à certaines époques quand le bouclier géomagnétique est provisoirement détruit et ne joue plus, pour plusieurs milliers d'années, son rôle protecteur.

J'ai donné dans l'avant-propos une définition de l'impactisme invisible qui regroupe en fait deux impactismes assez différents, mais qui ont la particularité commune de ne pas être identifiables à l'œil nu : les *particules* d'une part et les *poussières* et les *gaz* d'autre part.

Cette définition, sous sa forme simple, est la suivante :

" L'impactisme *invisible* concerne les rayonnements divers générés par les étoiles, dont le Soleil, et appelé impactisme *particulaire*, et aussi les gaz et les poussières d'origine cosmique qui rencontrent la Terre au cours de son périple dans le Système solaire et dans la Galaxie. "

Certains auteurs refusent de considérer cet impactisme comme un véritable impactisme. C'est une source différente, mais bien réelle, de matière et de rayonnements à laquelle la Terre est confrontée en permanence, mais d'intensité très variable, et à laquelle la vie s'est parfaitement adaptée. Adaptée veut dire qu'elle a évolué en fonction des quantités reçues et des conséquences qui en ont découlé. En fait, l'impactisme invisible a des conséquences uniquement biologiques et il agit donc d'une manière significative uniquement sur la biosphère terrestre. C'est la raison pour laquelle, dans *La Terre bombardée* de 1982, je l'avais intégré dans le chapitre regroupant " *Les conséquences biologiques et humaines de l'impactisme* ", et non dans celui consacré aux conséquences terrestres.

Comme nous le verrons en détail dans la partie " *Conséquences* ", aux chapitres 15 et 16, l'impactisme invisible joue un rôle déterminant dans l'évolution des espèces, car il est à l'origine de mutations génétiques et chromosomiques, irréversibles et parfois explosives. On le considère aujourd'hui comme responsable du "bruit de fond" des extinctions, bien mis en évidence à l'échelle géologique. Paradoxalement, on assimile ce bruit de fond à une évolution "gradualiste", on pourrait dire "darwinienne".

L'évolution "catastrophiste" concerne plutôt, selon les critères actuels, les extinctions de masse (cinq seulement ont droit à ce titre), les extinctions secondaires (une vingtaine) et mineures (une grosse trentaine), qui au total

ne dépassent pas la soixantaine pour les périodes géologiques depuis le Cambrien. Mais je précise bien que cette facilité de langage ne doit pas cacher l'essentiel : l'évolution due à l'impactisme particulière est bien, elle aussi, catastrophiste, mais elle est permanente à l'échelle géologique, alors que celle due à l'impactisme macroscopique est *épisodique, ponctuée* pour reprendre un terme à la mode, et associée aux "véritables" extinctions.

Dans ce chapitre, j'étudie l'impactisme invisible en tant que cause, au même titre que les astéroïdes et les comètes qui constituent le volet macroscopique de l'impactisme. Pour bien saisir tout l'intérêt et l'importance de cet impactisme invisible, il est utile de rappeler d'abord la définition de quelques termes et concepts usuels que nous allons retrouver dans ce chapitre et dans d'autres chapitres ultérieurs.

– *Aurore polaire* : phénomène atmosphérique qui résulte du bombardement des molécules de la haute atmosphère par les rayonnements corpusculaires du Soleil. Elles s'étendent entre 110 et 400 km d'altitude et peuvent prendre des formes diverses.

– *Eruption solaire* : brusque décharge d'énergie émise par les régions actives du Soleil, pouvant atteindre 10^{25} joules et une vitesse de 1500 km/s environ, et qui se manifeste au niveau terrestre par des orages magnétiques, des aurores polaires et des perturbations qui peuvent être parfois sérieuses dans les communications radiotélégraphiques.

– *Ion* : atome ou molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons. Une perte d'électron(s) conduit à une charge globale positive : l'ion est alors appelé cation. Un gain d'électron(s) conduit à une charge globale négative : l'ion est alors appelé anion.

– *Neutrino* : particule de masse nulle et dénuée de charge électrique, émise dans la radioactivité bêta en même temps que l'électron. Les neutrinos solaires sont émis par le cœur thermonucléaire du Soleil.

– *Plasma* : c'est un état de la matière que l'on peut schématiquement qualifier de gaz ionisé. Un plasma est un milieu globalement neutre (charge électrique cumulée des ions positifs = charge cumulée des ions négatifs + électron(s) qui peut être partiellement ionisé (mélange d'ions et d'atomes ou de molécules neutres) ou totalement ionisé. Son taux d'ionisation est d'autant plus élevé que le plasma est porté à haute température. Comme un plasma contient des espèces chargées, il est fortement influencé par les champs électromagnétiques.

– *Rayonnement* : ondes et particules associées, assurant un transport d'énergie dans tout l'Univers à partir de sources multiples. On distingue principalement le rayonnement *corpusculaire*, formé essentiellement par des particules telles que protons, neutrons, électrons et noyaux, et le rayonnement *électromagnétique*, associé, lui, à des ondes électromagnétiques ou à des photons associés.

– *Rayons cosmiques* : radiations provenant de l'espace intersidéral, constituées par des particules animées d'une très grande énergie (quelques dizaines de milliards d'électronvolts) provoquant dans l'atmosphère l'explosion d'atomes et la formation de gerbes de corpuscules.

– *Vent solaire* : flux de particules chargées, principalement des protons et des électrons, qui s'échappent en permanence de la couronne solaire dans le Système solaire jusqu'à plusieurs milliards de kilomètres, et dont certains effets sont assez comparables à ceux du vent terrestre. Sa vitesse au voisinage de la Terre varie énormément selon l'activité du Soleil : entre 250 et 850 km/s, ce qui est une vitesse tout à fait considérable. Il a une grande influence sur le champ magnétique terrestre.

Une découverte révolutionnaire : la radioastronomie

James Maxwell (1831-1879), le célèbre physicien anglais, avait pressenti le caractère électromagnétique de la lumière, découverte majeure qui fut prouvée par son confrère allemand Heinrich Hertz (1857-1894). Celui-ci, en 1888, mit le premier en évidence l'existence d'ondes radio, utilisables comme moyen de transmission. Ces deux géants de la physique, qui ont chacun une unité qui porte leur nom (1), allaient être à la base de tous les développements ultérieurs qui ont débouché sur une autre découverte révolutionnaire et totalement imprévisible pour tous les chercheurs antérieurs : les corps célestes, et l'Univers en général, nous envoient des messages sous forme de rayonnements invisibles mais néanmoins décelables à certaines longueurs d'onde.

La radioastronomie (2), à l'origine de laquelle est attaché le nom de l'ingénieur américain Karl Jansky (1905-1950) qui mit en évidence, en 1931, l'existence d'ondes venant de l'espace, permit de se rendre compte de l'extraordinaire violence de l'Univers, à travers l'étude d'une multitude d'astres différents. Le Soleil fut bien sûr le premier sujet d'étude, ses émissions ayant des conséquences directes pour la Terre, mais rapidement les radioastronomes mirent en évidence des "objets" et des "phénomènes" nouveaux (3), comme les quasars, les pulsars, les radiogalaxies, les restes de supernovae, les nuages et les molécules interstellaires, le rayonnement cosmologique et le rayonnement synchrotron.

On peut vraiment dire qu'avec la radioastronomie, c'est une nouvelle vision de l'Univers qui apparut, beaucoup plus complète (et aussi complexe) que l'ancienne qui se limitait à la fort étroite fenêtre optique. Des raies spectrales particulièrement intéressantes furent mises en évidence, comme la "raie 21 cm" de l'hydrogène à l'état atomique.

Les différents types de rayonnements

La Terre reçoit constamment du Soleil et de l'Univers galactique et même extragalactique des ondes électromagnétiques sous forme de rayonnements, dont l'œil humain (appareil d'enregistrement très imparfait) ne perçoit qu'une très faible partie : la lumière visible.

On sait que ces ondes électromagnétiques rencontrent la Terre à diverses longueurs d'onde et ces divers rayonnements extraterrestres sont étudiés avec soin par les astrophysiciens (4). Ceux-ci essaient de percer leurs secrets et de comprendre ainsi les divers phénomènes qui se produisent dans l'Univers, grâce notamment à des ballons-sondes, des fusées et des satellites spécialement équipés, car notre atmosphère est opaque à la plus grande partie du spectre électromagnétique.

Les ondes visibles ont des longueurs d'onde s'étalant de 3000 à 8000 angströms (c'est-à-dire allant de 0,3 à 0,8 micromètre) : c'est la fenêtre optique. On démontre en physique que l'énergie transportée par un photon (particule de charge nulle associée à une onde électromagnétique) est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Cela signifie que les rayonnements *ultraviolet* (UV), *X* et *gamma* qui suivent le rayonnement visible dans le spectre électromagnétique ont une longueur d'onde de plus en plus petite et une énergie de plus en plus élevée. Le domaine de l'ultraviolet s'étale de 100 à 3000 angströms, celui des rayons X de 0,2 à 100 angströms (leur énergie va de 0,1 à 50 keV) et celui des rayons gamma concerne les longueurs d'onde inférieure à 0,2 angström (leur énergie est supérieure à 50 keV). Ces trois catégories de rayonnements sont principalement d'origine solaire, mais proviennent aussi pour une petite part d'objets galactiques.

Il faut insister sur cette chance extraordinaire qu'ont les astronomes contemporains de posséder une matière première comme la lumière, qui est diffusée par les astres de l'Univers sous des formes diverses, et de savoir en déchiffrer le contenu (le message) grâce à la spectroscopie. Longtemps, leurs prédécesseurs en furent réduits à l'étude de la seule fenêtre optique. La technique, adjointe numéro 1 de la science, a permis progressivement d'ouvrir d'autres fenêtres, véritables ouvertures sur un monde qui ne demande qu'à se laisser déchiffrer :

- le rayonnement *infrarouge* pour tout ce qui est *froid* ;
- le rayonnement *ultraviolet* pour tout ce qui est *chaud* ;
- le rayonnement *radio* pour tout ce qui est *bruyant* ;
- les rayonnements *X* et *gamma* pour tout ce qui est *violent*.

Toute une gamme hétéroclite d'objets et de particules totalement insoupçonnés auparavant a pu être mise en évidence. Une chose est sûre, l'Univers est extrêmement violent, même si l'homme, à son échelle et avec sa "vue basse et sélective", ne s'en rend pas compte. Comme je l'ai rappelé au chapitre 5, nous vivons bien dans un Univers cataclysmique, à une échelle qui nous dépasse largement.

L'astronomie de la violence

On appelle *astronomie de la violence* celle concernant les rayonnements X et gamma (5/6). C'est tout à fait justifié. Le développement de la recherche spatiale, à partir des années 1960, a permis d'observer notre Univers dans des domaines du spectre électromagnétique jusque-là inexplorés, pour la bonne raison que notre atmosphère terrestre est un écran fort efficace pour toute une série de rayonnements. On sait que c'est grâce à cette atmosphère "imperméable" (en période ordinaire) que la vie terrestre est possible (sous sa forme actuelle), car les photons les plus énergétiques (ultraviolets, rayons X et gamma) sont piégés et n'atteignent pas le sol. Cette astrophysique des hautes énergies a donc connu un développement prodigieux en moins d'un demi-siècle et a totalement renouvelé notre conception de l'Univers.

Deux satellites spécialisés, l'allemand *ROSAT* (RöntgenSATellit) (7), lancé en 1990, et l'américain *GRO* (Gamma Ray Observatory) (8), baptisé par la suite *Compton*, lancé en 1991, ont permis à l'astronomie des rayons X de faire sa première révolution et ont contribué à une multitude de découvertes.

L'astronomie gamma, qui est la plus énergétique (après celle concernant les rayons cosmiques), concerne des longueurs d'onde inférieures à 0,01 angström (alors que la fenêtre optique s'étale entre 3000 et 8000 angströms). Les astrophysiciens des hautes énergies caractérisent plutôt les photons gamma par leur énergie, exprimée en kiloélectrons-volts (1 keV = 10^3 eV) ou même en mégaélectrons-volts (1 MeV = 10^6 eV). Ainsi on observe des photons galactiques avec une énergie supérieure à 50 MeV.

L'astronomie X et gamma, c'est l'astronomie de la violence. C'est la raison pour laquelle ses sources sont généralement associées aux phases ultimes, cataclysmiques, de l'évolution des étoiles massives, comme les supernovae, les étoiles à neutrons et même les trous noirs. On sait que l'explosion des supernovae contribue à la formation d'éléments plus lourds que le fer (que la nucléosynthèse ordinaire n'est pas en mesure de produire) qui s'accompagne de l'émission de raies gamma caractéristiques des éléments nouvellement créés. Ces supernovae sont également associées à des émissions violentes de rayons X et radio, comme c'est le cas pour notre nébuleuse du Crabe, résidu de la supernova de 1054 observée par les Chinois dans la constellation du Taureau. On parle aujourd'hui d'*hypernovae*.

Le rayonnement gamma se caractérise par des sursauts de très courte durée (souvent inférieurs à une seconde), des bouffées d'énergie émises de toutes les directions de l'Univers que l'on qualifie souvent de *flashes*, tellement leur durée est infime à l'échelle du temps astronomique. Ce n'est que dans les années 1990 que l'on a pu réellement mettre en évidence une "contrepartie" à ces sursauts dans les trois autres domaines du rayonnement : les domaines visible, infrarouge et X. L'apport d'autres satellites modernes, comme l'américain *Hubble* (pour le visible) et l'italo-néerlandais *BeppoSAX* (pour les domaines X et gamma), a été déterminant et a complété le fantastique travail effectué par *ROSAT* et *GRO*.

La première question que se sont posé les astrophysiciens est bien sûr celle-ci : " *Où tous ces phénomènes prennent-ils naissance : dans la Galaxie ou dans le domaine extragalactique ?* ". Plusieurs milliers de sursauts gamma ont déjà été répertoriés par les différents satellites spécialisés qui se sont succédé. Il semble aujourd'hui indiscutable qu'ils proviennent de toutes les directions de l'Univers, ce qui privilégie l'origine extragalactique, puisqu'une origine locale (galactique) devrait déboucher sur une distribution préférentielle le long de la Voie Lactée. Cette hypothèse extragalactique a de plus en plus de partisans puisqu'elle répond mieux aux observations.

Certains astrophysiciens dans les années 1980 penchaient plutôt pour un gigantesque halo de matière entourant notre Galaxie à quelque 320 000 années lumière, qui se serait formé à la suite de l'éjection d'étoiles à neutron galactiques. La question associée à cette hypothèse "galactocentrique" était donc celle-ci : " *Pourquoi n'observe-t-on pas une concentration de sursauts gamma autour des galaxies voisines, notamment celle d'Andromède qui est très proche à l'échelle de l'Univers ?* ".

Une troisième "école" était résolument progalactique et prônait une origine *proche* pour les sursauts gamma, car ceux-ci existent aussi, cela est indéniable. Pour la première fois le 28 février 1997, un sursaut gamma, baptisé GRB 970228 (GRB pour *Gamma Ray Burst* et les chiffres pour la date concernée), qui a duré 80 secondes et qui a pu être localisé avec précision, a été également enregistré en X. Dès le 3 mars, l'intensité du sursaut avait diminué d'un facteur 20. En moins d'un mois, la source s'est déplacée sur le ciel de quelques millièmes de seconde d'arc. Ce mouvement infime, mais très important pour la crédibilité des différents modèles en concurrence, est compatible avec une étoile dense et proche, puisque située à environ 320 années lumière. L'origine galactique est donc quasi certaine pour ce sursaut.

Mais cela ne veut pas dire que les autres hypothèses doivent être éliminées pour autant. Rien n'empêche que plusieurs solutions soient vraies, puisqu'il n'y a aucune raison de croire que les événements cosmiques de toute nature soient différents dans les différentes régions de l'Univers. Partout, les mêmes causes ont les mêmes effets. Simplement, évidemment, les événements galactiques étant les plus proches, ils ont une meilleure chance d'être détectés et d'être privilégiés dans les modèles des astrophysiciens.

Il reste à connaître une chose essentielle : pourquoi une telle violence ? L'imagination des scientifiques, surtout des astrophysiciens, a fait merveille sur ce sujet neuf, et plus d'une centaine d'hypothèses ont été proposées. Différents modèles répondent mieux aux observations, critère indispensable pour un minimum de crédibilité. Parmi ceux-ci, celui de l'étoile à neutron tient la corde, même si d'autres restent tout à fait possibles.

Une étoile à neutron est une étoile extrêmement dense (densité voisine de 100 millions de tonnes par cm³) et de très petites dimensions (diamètre de 10 à 20 km seulement) qui est constituée essentiellement d'un gaz de

neutrons. Leur masse est comprise entre 1,5 et 3 masses solaires, insuffisante pour avoir créé un trou noir (minimum 4 masses solaires et diamètre de 25 km environ). Les étoiles à neutron sont le résidu stellaire des explosions de supernovae et se manifestent sous forme de pulsars. Ces objets cosmiques, découverts en 1967, sont des sources de rayonnement bien connues (surtout dans le domaine radio, mais aussi domaines optique, X et gamma) qui se caractérisent par des émissions très brèves et régulières (avec des périodes comprises entre 1,5 milliseconde et plus de 3 secondes), en relation avec leur rotation extraordinairement rapide.

Pour les partisans de l'hypothèse extragalactique, la production des rayonnements serait liée à la coalescence (fusion) d'étoiles à neutron, ou bien à la rencontre entre une étoile à neutron et un trou noir. L'énergie dégagée serait liée à des tremblements du pulsar dus à la vitesse de rotation et se traduirait par l'émission des bouffées de rayonnement observées.

Mais nous n'en sommes qu'au début des recherches et bien des surprises attendent les astrophysiciens. Leurs modèles sont toujours bien simplistes comparés à la réalité et à la complexité des phénomènes cosmiques. Pour le moment, d'après tous les spécialistes, les sursauts gamma constituent l'un des mystères les plus épais de l'Univers. Le XXI^e siècle permettra dans ce domaine des avancées, sinon décisives tout au moins significatives.

Les brillants résultats obtenus dans cette spécialité de l'astronomie de la violence sont l'occasion de rappeler tout le bénéfique que les astrophysiciens sont en droit d'espérer de l'apport de futures sondes spécialisées. L'argent investi ne l'est pas en vain.

Les rayons cosmiques

Il existe encore un rayonnement extraterrestre beaucoup plus énergétique que les précédents, connu sous le nom de *rayonnement cosmique* (9/10). Il s'agit d'un flux de particules chargées électriquement (et non plus de photons comme c'est le cas pour les rayons X et gamma), constitué principalement de noyaux d'atomes d'hydrogène appelés protons (90 %) et de particules alpha (noyaux d'hélium), provenant du Soleil et de la Galaxie et qui traversent l'Univers à une vitesse voisine de celle de la lumière.

Dans ce rayonnement figurent encore en quantité très secondaire des noyaux d'atomes plus lourds (jusqu'au groupe du fer, de masse atomique 56), des électrons et des photons gamma. Les physiciens ont observé que l'énergie individuelle de certaines particules du rayonnement cosmique peut dépasser 10^{14} MeV, ce qui est absolument énorme, puisque c'est une énergie suffisante pour envoyer une masse de 1 kg à plusieurs mètres de hauteur.

Fort heureusement, en période normale, c'est-à-dire quand la Terre possède son champ magnétique et sa magnétosphère, la plupart de ces rayonnements cosmiques (qui sont des particules chargées, je le rappelle car c'est très important) subissent l'influence de ce champ magnétique et sont

piégés dans les ceintures de Van Allen. Celles-ci ont été découvertes par le physicien et astronome américain James Van Allen (1914-2006) dès le début de l'ère spatiale. C'est en dépouillant les données transmises par le satellite *Explorer*, lancé en 1958 par la NASA, que ce chercheur mit en évidence un flux de particules de haute énergie piégées dans la magnétosphère terrestre.

Il faut dire quelques mots sur cette magnétosphère terrestre qui est un paravent indispensable en période normale. On la définit comme la zone extérieure à l'atmosphère s'étendant autour de la Terre, dans laquelle le champ magnétique subit l'influence de l'activité solaire. Elle a une forme très particulière puisque le champ magnétique est déformé sous l'effet du vent solaire et que les perturbations subies ne sont pas partout identiques. De ce fait, la partie tournée vers le Soleil, "côté jour", est comprimée et s'étend seulement jusqu'à dix ou quinze rayons solaires (70 000 à 100 000 km), alors que l'autre partie, "côté nuit", s'étend très profondément dans l'espace (plusieurs centaines de rayons terrestres).

Comme nous le verrons dans les chapitres consacrés aux conséquences de l'impactisme, quand cette magnétosphère ne fait plus son office de paravent lors de la disparition du champ magnétique, c'est la catastrophe pour la vie (la vie existante s'entend). Les rayonnements de toute nature, et notamment les rayons cosmiques qui sont les plus énergétiques, franchissent le mur de l'atmosphère et l'irradiation cosmique joue à plein, avec comme conséquence immédiate une augmentation notable de la radioactivité. A forte dose, la majorité des espèces terrestres n'aiment pas.

Pour en revenir aux rayons cosmiques en période normale, c'est-à-dire durant au moins 90 % du temps, outre la partie piégée dans les ceintures de Van Allen, une autre partie se heurte à la carapace atmosphérique. La très grande majorité de ces rayons primaires de très haute énergie rescapés se désintègre à l'occasion de collisions avec les atomes de l'atmosphère, pour former des *gerbes* de particules secondaires moins énergétiques. Celles-ci, à leur tour, en entrant en collision avec d'autres atomes atmosphériques engendrent une troisième génération de particules, et ainsi de suite. Il en résulte que le rayonnement cosmique reçu à la surface terrestre est en grande partie composé de produits de désintégration (11).

En période ordinaire, on a constaté que l'intensité du flux du rayonnement cosmique augmente d'environ 20 % lorsque l'on passe de l'équateur au pôle, cela étant dû à la forme caractéristique de la magnétosphère et de l'épaisseur, variable selon les latitudes, des diverses couches atmosphériques. Quoique très affaiblis en arrivant au sol, les rayons cosmiques maintiennent depuis toujours à la surface de la Terre un taux important de radioactivité, bien supérieur à celui engendré par les activités humaines, même à l'époque actuelle avec la prolifération des centrales nucléaires. Contrairement à la radioactivité à haute dose dont j'ai parlé et qui est néfaste, la radioactivité normale, ordinaire, est bénéfique à la croissance harmonieuse des êtres vivants.

L'étoile Soleil

Le Soleil (12/13) est le maître absolu du Système solaire (il représente à lui tout seul 999/1000 de la masse totale), bien qu'il soit intrinsèquement une étoile banale de la Galaxie (type G2 et magnitude absolue + 4,8). En première approximation, c'est une sphère de gaz incandescents, d'un rayon de 696 000 km (soit 109 rayons terrestres) et d'une masse de l'ordre de $2,10^{27}$ tonnes (333 000 masses terrestres en gros), au centre de laquelle la température atteint près de 15 millions de degrés. Sa densité moyenne est de $1,4 \text{ g/cm}^3$ (soit environ un quart de la densité terrestre). On considère qu'il est constitué en gros de 73 % d'hydrogène, de 25 % d'hélium et de 2 % seulement d'éléments plus lourds (parmi lesquels le carbone, l'azote, l'oxygène et le fer). Sa surface est connue avec ses diverses manifestations de violence dont certaines ont des répercussions jusque sur la Terre.

C'est dans le noyau solaire (le cœur nucléaire qui pourrait atteindre jusqu'à 20 % du rayon de l'étoile), que l'on soupçonne d'avoir une densité de l'ordre de $140/160 \text{ g/cm}^3$ (soit 100 fois la densité moyenne) qu'a lieu l'essentiel de la production d'énergie par la classique transformation d'hydrogène en hélium selon deux processus différents : le cycle proton-proton et le cycle carbone-azote. On sait que cette "combustion nucléaire" libère une fantastique quantité d'énergie, sous une double forme de chaleur et de lumière. Car c'est cela la principale caractéristique du Soleil : c'est une machine à fournir de l'énergie. A chaque seconde, on estime qu'environ 600 millions de tonnes d'hydrogène sont "brûlés", un chiffre tellement énorme qu'il ne parle pas vraiment à l'échelle humaine.

Le cheminement de l'énergie produite dans le Soleil a été étudié très en détail par les astrophysiciens solaires et il est bien connu, du moins dans ses grandes lignes.

L'anatomie du Soleil

En partant du centre vers l'extérieur, on se trouve en présence de six zones, d'une importance très différente. Les trois premières occupent chacune environ un tiers du rayon solaire, les trois zones externes que sont la photosphère (la surface du Soleil), la chromosphère et la couronne (l'atmosphère) ne constituant que la partie visible du Soleil. Je vais dire quelques mots sur ces six zones, car il est indispensable de savoir le strict minimum sur notre étoile, source numéro un de l'impactisme particulière.

– *le noyau*. Le centre du Soleil est occupé par un noyau (ou cœur), entre 0 et 0,3 rayon solaire, au sein duquel la température varie de 15 millions de degrés au centre à 7 millions à l'extérieur. La densité est de l'ordre de 150 g/cm^3 et baisse jusqu'à 10 g/cm^3 à la limite du noyau. Evidemment, dans ces conditions extrêmes, aucune combinaison moléculaire n'est possible et les atomes sont *ionisés*. Le plasma central est constitué d'ions d'hydrogène et d'hélium en agitation thermique permanente. C'est dans ce

cœur de l'étoile qu'a lieu pour l'essentiel la transformation d'hydrogène en hélium et aussi la production des neutrinos. Il faut aussi savoir que ce cœur est déjà appauvri en hydrogène après une vie de 4,6 milliards d'années et que c'est donc entre 0,1 et 0,2 rayon solaire que la production d'énergie est maximale.

– *la zone radiative*. C'est la zone intermédiaire comprise entre 0,3 et 0,7 rayon solaire, de loin la plus massive. La température diminue de l'intérieur vers l'extérieur de 7 à 1 millions de degrés et la densité de 10 à 1. Les photons produits dans le noyau traversent cette large zone en transportant la quasi-totalité de l'énergie solaire vers la surface, à une vitesse très lente puisqu'on estime à quelques millions d'années le temps nécessaire. Dans le vide un tel trajet serait effectué par la lumière en à peine une seconde.

– *la zone convective*. C'est la zone externe comprise entre 0,7 et 0,999 rayon solaire, qui ne représente seulement que 2 % de la masse de l'étoile. La température diminue de 1 million de degrés à 15 000 K et la densité de 1 g à 3×10^{-6} g/cm³. Son rôle principal est d'évacuer vers l'extérieur l'énergie générée par les deux zones internes. Elle est traversée de "tubes" de champ magnétique responsables de l'activité solaire et de son cycle et qu'elle est le lieu d'un formidable brassage de matière et de rayonnement.

– *la photosphère*. C'est la "surface" du Soleil à laquelle on attribue une profondeur de l'ordre de 400 km seulement. La température augmente de l'extérieur (4000 K) vers l'intérieur (8300 K) avec une moyenne de 6000 K environ. La pression et la masse augmentent également quand on s'enfonce vers l'intérieur. Cette surface se caractérise par sa structure granulée, avec des granules de forme ronde ou polygonale, d'un diamètre pouvant aller de 200 à 1800 km, qui sont des bulles de gaz de 200 à 300° plus chaudes que la surface. C'est dans cette zone qu'apparaissent les taches solaires, baromètre de l'activité solaire.

– *la chromosphère*. Cette couche a environ 8000 km d'épaisseur, avec une température de 5000 K dans la partie basse et de 20 000 K dans la partie haute. C'est déjà l'atmosphère du Soleil, considérée comme l'atmosphère basse, c'est-à-dire une zone très inhomogène en température et en densité, formée d'une grande variété de structures différentes : spicules, protubérances, facules. Elle est le siège des éruptions solaires, phénomène important lié souvent à l'apparition des taches solaires.

– *la couronne solaire*. C'est la partie extérieure de l'atmosphère solaire, zone de transition entre le Soleil lui-même et l'espace interplanétaire, dont l'aspect varie en fonction de l'activité solaire. En fait, on distingue plusieurs composantes coronales (K, F, E et T). La caractéristique essentielle de la couronne est son extraordinaire température qui peut atteindre plusieurs millions de degrés, c'est-à-dire près de 1000 fois plus que la température de la chromosphère.

On voit à travers l'étude très sommaire des six zones principales du Soleil comment l'énergie, formée dans le cœur, traverse ensuite les couches radiative et convective, atteint la photosphère et quitte l'étoile. Le Soleil est bien une formidable machine à produire de l'énergie, et à produire aussi les conditions nécessaires à la vie. Sans Soleil, évidemment pas de vie.

Le satellite américano-européen *SOHO* (Solar and Heliosphere Observatory) (14), lancé en 1995 pour étudier le Soleil sous toutes les coutures, a permis plusieurs avancées décisives. Il a notamment découvert dans le Soleil, près des deux pôles, d'étranges mouvements gazeux comparables aux courants-jets de l'atmosphère terrestre. Ces courants polaires sont de véritables "fleuves de plasma" qui circulent sous la surface solaire à environ 130 km/heure. D'autre part, des phénomènes analogues aux alizés terrestres ont été aussi repérés près de l'équateur dans deux ceintures larges de 65 000 km, de part et d'autre de cet équateur solaire. Ils se traduisent par des bandes gazeuses en interaction qui se déplacent à des vitesses différentes et qui ont une durée de vie de 11 ans, comparable et en liaison avérée avec celle du cycle solaire. Ce double phénomène est totalement indiscernable de la Terre et il a fort surpris les spécialistes du Soleil.

Mais ces nouveautés peuvent-elles vraiment être qualifiées de "surprises" ? Il est bien évident que nous ne sommes pas au bout de nos surprises avec notre étoile. On ne connaît encore que très imparfaitement l'intérieur du Soleil, et les modèles actuels devront être constamment réactualisés. Les sondes spécialisées, notamment, permettront de nombreuses autres avancées significatives.

Le Soleil et la Terre

Le Soleil est notre étoile et il est de très loin l'astre principal du Système solaire (15/16), puisqu'il monopolise à lui seul 999/1000 de la masse totale. Pourtant, ce Soleil n'est qu'une étoile Galaxie. On voit le rapport de force de tous les composants de l'Univers : l'homme n'est rien par rapport à la Terre, qui n'est rien par rapport au Soleil, qui n'est rien par rapport à la Galaxie, qui n'est rien par rapport à l'Univers dans son ensemble. La Terre n'existe qu'à l'échelle du Système solaire, dont elle est un élément tout à fait mineur, même si nous lui accordons une importance un peu démesurée.

Bien évidemment, la vie terrestre est totalement tributaire du Soleil, et elle n'existe qu'en fonction de lui et grâce à lui. Nos ancêtres l'avaient bien compris, eux qui en firent leur premier dieu, celui à qui ils devaient tout. Les astronomes, notamment les spécialistes du Soleil, savent que les sursauts de notre étoile peuvent être particulièrement dangereux en certaines circonstances particulières. Jean Rösch (1915-1999), qui fut mon directeur de thèse, considérait plus dangereux pour la vie l'impactisme particulière qu'il connaissait bien que l'impactisme macroscopique dont je m'occupais prioritairement. C'est lui qui m'a poussé à travailler sur une synthèse des deux, complémentaires sur le long terme.

Cette vie terrestre ne peut exister que parce que le Soleil est une étoile relativement stable, même si elle a une activité permanente légèrement variable selon les époques. Certains astronomes (17) considèrent que le Soleil est en fait une étoile magnétique variable et quasi périodique possédant une récurrence de 22 années. D'autres ont noté depuis longtemps (18) que si le Soleil était une étoile très variable, comme *Mira Ceti* (la Merveilleuse de la Baleine) par exemple, dont le débit d'énergie varie d'un facteur 100 en 330 jours, l'équilibre thermique de la Terre en serait très profondément modifié, avec des conséquences inévitables sur le monde vivant. La biosphère serait détruite dans sa quasi-totalité et l'homme, bien sûr, n'existerait pas, n'aurait jamais pu exister.

Cette importance démesurée que l'homme s'accorde peut être battue en brèche quand le Soleil pique une petite colère, ou plus simplement en période de forte activité solaire. Car, comme toutes les autres étoiles comparables, il génère toute une gamme de rayonnements qui ont une interactivité avec l'atmosphère terrestre, et donc avec nous.

Dans le *Parisien Libéré* du 18 février 1980 (19), un très intéressant article concernant la période d'activité solaire alors près de son maximum commençait avec un gros titre accrocheur : " *Lorsque le Soleil brûle... la Terre s'enflamme* ", suivi du chapeau de présentation suivant :

" Lorsque le soleil brûle, la terre s'enflamme. Pas au sens propre bien sûr, mais il est aujourd'hui démontré que les périodes d'intense activité solaire comme celle que nous traversons en ce moment ont des répercussions sur notre planète, aussi bien sur la vie des plantes que sur celle des hommes. Or, en notre année 1980, alors que des crises graves secouent le monde, les éruptions qui bouleversent la couronne solaire sont les plus importantes que l'on ait jamais connues. Ceci explique-t-il cela ? On peut se le demander et certains savants en sont persuadés, même s'ils n'osent pas le dire tout haut. "

Quels sont les rapports exacts entre l'activité solaire et la vie terrestre ? La liaison est indéniable, mais à quel niveau ? On connaît surtout bien sûr le problème des cernes des arbres qui ont permis de repérer les années chaudes dans le passé historique et ainsi d'établir un calendrier climatologique d'une fiabilité incontestable, en liaison avec le cycle solaire. Autre exemple bien connu : la variabilité de l'atmosphère et la quasi-impossibilité de prédire le retour de certains satellites qui ont vu leur durée de vie sérieusement écourtée (notamment *Skylab 1* en 1979) parce que la haute atmosphère était nettement plus dense que prévu, anomalie en relation certaine avec l'activité solaire.

Cette corrélation entre le cycle solaire et les perturbations qui affectent notre globe intrigue, mais jusqu'où peut-on aller ? Certains médecins, durant le second semestre de 1979, ont annoncé une recrudescence significative des crises cardiaques et une nervosité très sérieusement accrue chez les jeunes

alors que l'activité solaire était proche du maximum. Ils voyaient la raison de ces troubles dans les orages magnétiques supportés par la Terre et beaucoup plus violents qu'en période calme. Humains et animaux seraient plus "électriques" en période de forte activité solaire, avec des conséquences parfois imprévisibles sur leur comportement psychique. Je reviendrai sur cet intéressant sujet dans la partie "*Conséquences*", mais nous allons voir maintenant ce qu'il faut savoir des éruptions solaires et du vent solaire.

Les colères du Soleil

Je me limiterai ici à deux aspects importants de cette colère solaire permanente, aspects d'ailleurs tout à fait complémentaires.

Les éruptions solaires

Les éruptions solaires (20) se traduisent essentiellement par une émission à partir de la chromosphère de trois composants principaux :

- des *ondes électromagnétiques* (radio, visible, rayons UV et X) qui atteignent la Terre en 8 minutes seulement, ce qui veut dire qu'elles voyagent quasiment à la vitesse de la lumière.
- des *protons* qui atteignent la Terre en 1 à 5 heures.
- un *nuage de plasma*, beaucoup plus lent à atteindre la Terre puisqu'il lui faut de 20 à 50 heures.

On en retrouve la trace sur la Terre à de nombreux niveaux dans le cas de phénomènes de grande ampleur qui se produisent à une fréquence que l'on peut estimer à la dizaine d'années en moyenne.

- *dans la basse atmosphère* (jusqu'à 80 km d'altitude), c'est-à-dire la troposphère, la stratosphère et la mésosphère, où des effets météorologiques, biologiques et sur la couche d'ozone ont été notés.
- *dans le champ magnétique terrestre*, avec des orages magnétiques.
- *dans les diverses couches de l'ionosphère* (baptisées E, D, F₁ et F₂ et situées entre 80 et 500 km), qui sont très sensibles à ces orages magnétiques, avec des perturbations importantes dans les télécommunications (21).
- *dans la haute atmosphère* (de 500 à 1000 km), qui est sous la dépendance directe du flux solaire et qui est donc très sensible aux variations de ce flux. On a noté un réchauffement des gaz de l'atmosphère se traduisant par des variations de densité (phénomène qui peut, nous l'avons dit, accélérer ou retarder la rentrée des véhicules spatiaux), des phénomènes lumineux dus à l'excitation et à l'ionisation des molécules et des atomes (aurores polaires, luminescence du ciel nocturne).

– dans l'exosphère, partie la plus externe de l'atmosphère (au-dessus de 1000 km), et qui est donc déjà un milieu très dilué où se trouvent les ceintures de Van Allen.

Le vent solaire

Le vent solaire (22) est l'une des manifestations les plus spectaculaires du Soleil. Son existence a été envisagée en 1951 par l'astrophysicien allemand Ludwig Biermann (1907-1986) pour expliquer un phénomène qui intriguait les astronomes depuis très longtemps : pourquoi la queue des comètes se dédouble-t-elle ? Cette queue est formée de gaz et de poussières et s'étend sur des distances pouvant atteindre plusieurs millions de kilomètres. Elle a la particularité d'être toujours orientée dans la direction opposée au Soleil. Biermann comprit qu'une partie des gaz est formée de matière neutre et s'oriente sous l'effet de la pression de la lumière solaire (la pression de radiation).

Une autre partie est constituée de matière *ionisée* par le rayonnement ultraviolet du Soleil. Biermann montra que la pression de radiation était insuffisante pour orienter la queue ionisée et qu'un autre mécanisme était obligatoire, généré par un flux de particules chargées en provenance du Soleil lui-même : le vent solaire. Cette découverte a été totalement confirmée, et depuis le vent solaire a donné lieu à de multiples travaux, en liaison avec ceux concernant la couronne solaire, surtout depuis l'ère spatiale et l'envoi d'engins spatiaux spécialisés. Ceux-ci étant débarrassés de l'obstacle que constitue l'atmosphère, ils peuvent étudier le Soleil et ses diverses manifestations en direct.

Le vent solaire est un flux de particules chargées, essentiellement des protons, des électrons et des noyaux d'hélium (avec aussi des traces infimes d'ions d'éléments plus lourds comme l'oxygène et le carbone) qui s'échappent en permanence de la couronne solaire et qui pénètrent le milieu interplanétaire avec des vitesses considérables, comprises en général entre 200 et 900 km/s, vitesse qui peut dépasser 1500 km/s lors de très fortes éruptions. Certains protons peuvent posséder alors une énergie de dix milliards d'électrons-volts. Son extension est étroitement contrôlée par le champ magnétique du Soleil.

On estime que la masse éjectée sous forme de vent solaire est d'environ une mégatonne par seconde, ce qui est insignifiant à l'échelle du Soleil. Une de ses caractéristiques est son extrême irrégularité, liée au fait que l'évasion de la matière varie considérablement selon la température de la haute atmosphère qui est elle-même directement commandée par l'ensemble des phénomènes de surface constituant l'activité solaire. Ainsi l'intensité du vent solaire peut varier dans un rapport de 1 à 50, ce qui est considérable, selon que le Soleil est en période calme ou agitée, alors que sa vitesse varie dans le même temps d'un facteur 10 (de 200 à 2000 km/s).

Une remarque importante a été faite par les spécialistes du Soleil. La température de la haute atmosphère n'a rien à voir avec celle de sa surface qui ressort en moyenne à 6000 K seulement, valeur typique pour une étoile de type spectral G2. Par contre, c'est en millions de degrés que se mesure la température de la haute atmosphère, ce qui peut paraître incompréhensible pour les non-spécialistes. Cela a des conséquences très importantes sur la nature de cette atmosphère. Sa composition ressort en gros à 87 % d'hydrogène, 12,9 % d'hélium, le reste des éléments se partageant le 0,1 % restant, avec des traces d'oxygène (0,025 %) et d'azote (0,02 %). Compte tenu de la température, ces éléments n'existent pas sous la forme d'atomes complets, mais sous la forme d'atomes *ionisés* (c'est-à-dire ayant perdu un ou plusieurs électrons) et d'électrons libres. Et surtout, l'atome d'hydrogène ayant perdu son unique électron, il se trouve réduit à un simple proton.

Ainsi, le vent solaire ne se présente pas comme un gaz classique, mais comme un plasma qui émet principalement en rayons X. Il s'échappe de la couronne solaire dans toutes les directions et baigne l'ensemble du Système solaire jusqu'à la fin de sa zone d'influence (appelée *l'héliosphère*) que l'on situe entre 100 et 150 UA.

On comprend donc qu'en période de crise, quand le vent solaire devient "tempête", le Soleil largue dans l'espace une quantité énorme de matière ionisée heureusement canalisée au niveau de la Terre par la magnétosphère, notre premier et principal paravent "antiradiations", le second, encore assez efficace pour certains rayonnements, étant l'atmosphère elle-même.

Mais nous avons vu plus haut qu'il n'en faut pas beaucoup pour perturber la machine humaine, qui paraît bien fragile, aussi bien au niveau physique que psychique. La technologie aussi, de plus en plus souvent au fur et à mesure qu'elle se développe, va souffrir des caprices du Soleil et les quelques alertes de ces dernières années donnent à réfléchir.

La tempête magnétique du 10 janvier 1997

Nous avons eu un excellent exemple de "*tempête*" magnétique le 10 janvier 1997 (23), lorsqu'un gigantesque nuage magnétique solaire est venu frapper la magnétosphère terrestre. Et pourtant, il faut le signaler, à l'époque le Soleil était dans la période de creux de son cycle d'activité, dans une période de Soleil calme donc. Cet événement, rare par son intensité, a été enregistré par les satellites *SOHO* et *WIND*, spécialisés dans l'étude du Soleil et son environnement. C'était la première fois qu'un événement de cette nature a pu être suivi dès sa naissance et pendant son extension et sa propagation dans le Système solaire, d'où son intérêt tout particulier pour les chercheurs qui en ont disséqué toutes les phases pour affiner leurs modèles.

Ce nuage de particules de plusieurs milliards de tonnes de matière a été éjecté du Soleil le 6 janvier. On pense que les lignes du champ magnétique solaire se sont "débobinées" (selon le terme des spécialistes) et l'énergie magnétique s'est en grande partie transformée en énergie cinétique.

Le nuage, qui était en fait une véritable "bulle de particules", a atteint la Terre quatre jours plus tard, avec une vitesse encore égale à 450 km/s, ce qui est considérable quand on sait l'importance du facteur vitesse dans toute collision. Heureusement que la magnétosphère était bien en place pour faire son travail de bouclier. Au niveau du sol, seuls des aurores polaires et des orages magnétiques (moins violents d'ailleurs que ceux de 1989 lors du pic de l'activité solaire) furent enregistrés.

Le diamètre du nuage, qui s'est progressivement dilaté en s'éloignant du Soleil, était de 26 MK en nous atteignant, diamètre là encore considérable. Le choc a été sévère avec la magnétosphère, et celle-ci s'est, semble-t-il, sérieusement comprimée pour amortir l'énergie cinétique. Tant et si bien que certains chercheurs se sont demandé si la frontière interne de la magnétosphère n'était pas descendue au-dessous de 36 000 km de la surface terrestre, distance à laquelle gravitent, on le sait, les satellites géostationnaires.

Lorsqu'un événement de ce type se produit, les satellites ne sont plus protégés (tout au moins extérieurement) par le bouclier magnétique et sont exposés directement aux particules cosmiques. Gare si le blindage externe est insuffisant ! Ingénieurs et techniciens redoutent cela comme la peste, car ils savent bien que l'accumulation de particules très énergétiques peut percer certains blindages déficients et ainsi endommager très sérieusement les circuits électroniques, au point parfois de les rendre inutilisables.

Ce n'est probablement pas une coïncidence si le satellite américain de communication *Telestarc 401* a cessé d'émettre le lendemain de la tempête magnétique, le 11 janvier 1997. On a calculé que le courant électrique déchargé dans la magnétosphère a dépassé le million d'ampères. Heureusement qu'en général le blindage des satellites est à toute épreuve, sinon cela aurait pu être une véritable débâcle technologique (et financière). Les jours suivants, tout est redevenu calme, la tempête était passée...

La matière interplanétaire

Sous ce titre générique, on regroupe l'ensemble des gaz et des poussières qui se trouvent entre les planètes et le Soleil. Le milieu interplanétaire est un milieu très hétéroclite et très actif, associant une densité de matière très faible à une étonnante diversité de composition, diversité due évidemment à l'origine multiple de ses composants.

Nous allons étudier sommairement ces différents composants, mineurs mais bien réels, qui sont en mesure d'avoir une interaction avec la Terre et de participer à l'impactisme invisible, sous forme de poussières déposées sur la surface terrestre après avoir séjourné plus ou moins longtemps dans l'atmosphère.

La lumière zodiacale

Elle apparaît comme l'une des manifestations visibles de la matière interplanétaire, et est aussi connue sous le terme de *gegenschein* ou *lumière anti-solaire*. Déjà connue dans l'Antiquité, elle fut décrite en 1803 par le naturaliste allemand Alexander von Humboldt (1769-1859) comme une tache lumineuse faible située à l'opposé du Soleil. De nombreuses observations ultérieures ont conclu plus précisément à l'existence d'une bande lumineuse appelée le pont zodiacal qui s'étend tout au long de l'écliptique et joint la lumière zodiacale de l'ouest et de l'est en passant par le *gegenschein*. Celui-ci résulte de la diffusion de la lumière solaire par un nuage de poussières situé à environ 1,6 MK de la Terre dans la direction opposée au Soleil où l'attraction combinée de la Terre et du Soleil crée des conditions particulières et piège la matière qui s'y trouve (les astronomes appellent ce point particulier le *point Moulton*, du nom de l'astronome qui l'a mis en évidence).

Les diverses origines de la poussière interplanétaire

Ces poussières sont évidemment de nature différente. La plus grande partie est constituée par la désintégration des comètes (24). Nous avons vu que le dégazage progressif libère une infinité de petits blocs de matière qui eux-mêmes s'émiettent pour redevenir poussière en se répandant tout au long de l'orbite du corps parent. C'est l'origine classique des essaims de météores (et éventuellement de météorites) qui donnent lieu chaque année à des pluies d'étoiles filantes près des points de croisement avec l'orbite terrestre.

L'autre source principale est constituée par les résidus de la fragmentation et de l'émiettement postérieur des astéroïdes, qui comme les comètes redeviennent poussière. J'ai dit au chapitre sur les astéroïdes que l'émiettement s'accélère, du fait d'un nombre sans cesse accru de fragments mineurs. Chaque collision produit une multitude de nouveaux fragments et de la poussière. Ainsi le renouvellement est permanent et la lumière zodiacale est constamment réalimentée.

D'autres sources secondaires existent pour cette poussière interplanétaire inépuisable. Une petite partie pourrait être un résidu direct de la nébuleuse à partir de laquelle le Système solaire s'est formé et qui n'aurait pas participé à la formation des planétésimales dont sont issues les planètes rescapées. Une autre partie pourrait être d'origine galactique et avoir été capturée par l'attraction gravitationnelle du Soleil à l'occasion de la traversée des nuages interstellaires, liée au grand mouvement du Système solaire autour du centre de gravité de la Galaxie. Une dernière partie pourrait être liée à de la matière planétaire éjectée des grosses planètes ou de leurs satellites à l'occasion d'impacts importants ou même à partir de phénomènes internes (volcanisme).

On sait que toute cette poussière interplanétaire est fortement influencée et perturbée par la pression de radiation solaire. En principe, elle est

condamnée à tourner sur des orbites héliocentriques de plus en plus petites et à finir capturée par le Soleil. Mais ce transfert des poussières dans des régions proches du Soleil est compensé par un renouvellement constant de la matière, comme nous l'avons vu pour les astéroïdes et les comètes. Ce renouvellement est global à tous les niveaux de la hiérarchie (c'est-à-dire de la masse des constituants), à partir d'objets en attente dans les parties extérieures du Système solaire, principalement dans le nuage de Oort et dans la ceinture de Kuiper.

Poussières et gaz interstellaires

Nous verrons dans les chapitres concernant les conséquences de l'impactisme et du catastrophisme que les éléments gaz et poussières peuvent s'avérer très importants dans certaines circonstances. Il convient donc de connaître l'essentiel sur le sujet, en sachant surtout que les étoiles sont les constituants principaux des galaxies et que c'est surtout à partir d'elles que la matière interstellaire, les particules et les divers rayonnements sont issus. Les étoiles sont les creusets de la matière, mais aussi paradoxalement de la vie. Tout le monde en est bien conscient de nos jours (hormis les créationnistes) : nous sommes des *poussières d'étoiles*.

La nature des poussières interstellaires

La spectrographie a clairement montré que les nuages interstellaires sont composés pour partie de particules de nature solide qui forment la poussière interstellaire au sens propre. Leur forme ordinaire est celle de grains allongés de l'ordre de 0,5 micromètre en moyenne, c'est-à-dire une poussière fine. Ces grains seraient composés essentiellement de combinaisons de carbone (graphite ou diamant), oxygène, silicium, fer, magnésium, éléments courants dans l'Univers, souvent recouverts d'une pellicule de glace ou d'ammoniac. Ces grains de poussière ont la particularité d'avoir une densité très faible : environ 10^{-13} particules par cm^3 . Ils ne représentent que 1 % (2 % dans certains nuages) de la masse des gaz, et sans doute moins de 1/2000 de la masse totale de la Galaxie.

Ces poussières sont principalement formées lors des éjections gazeuses à partir d'étoiles vieilles ou en fin d'évolution. Elles sont aussi le résidu du vent stellaire généré par les géantes rouges. On pense que les atomes projetés dans le milieu stellaire froid s'associent en molécules qui se solidifient, puis se dispersent pour former ou pour rejoindre un nuage interstellaire. Les astrophysiciens ont noté depuis longtemps la présence de poussières dans les enveloppes gazeuses d'étoiles jeunes (types O et B) qui sont encore environnées de résidus protostellaires non encore dispersés.

Enfin, il faut signaler que ces différentes poussières interstellaires sont bien repérables en infrarouge puisqu'elles émettent un rayonnement thermique identifiable. Elles sont l'une des proies des radiotélescopes terrestres et orbitaux. Le satellite *IRAS* (Infra-Red Astronomical Satellite), qui était muni d'un télescope infrarouge de 60 cm de diamètre et de 62 détecteurs et qui a

fonctionné durant l'année 1983, a repéré 250 000 sources (ce qui est tout à fait considérable), parmi lesquelles de longs filaments de poussière qui parsèment l'espace interstellaire et de disques de particules solides autour de certaines étoiles. La poussière est un constituant mineur (par sa masse totale) mais essentiel (par son importance) de l'Univers.

Les gaz interstellaires

Les gaz interstellaires sont un autre composant important de la matière de l'Univers. Ils se présentent principalement sous la forme de nébuleuses brillantes de types différents, depuis les immenses nuages d'hydrogène (comme la nébuleuse d'Orion qui a une masse de plus de 200 000 masses solaires et que l'on sait être une inépuisable pépinière d'étoiles en formation) jusqu'aux nébuleuses planétaires qui sont, au contraire, le résidu d'enveloppes stellaires et dont la masse est faible.

Le gaz est principalement constitué d'hydrogène atomique neutre (dans les régions appelées H I) et d'hydrogène atomique ionisé (dans les régions H II) avec des températures et des densités variables. Bien sûr, leur interaction avec les poussières est continue, et partout gaz et poussières font bon ménage. On n'est même pas loin de penser qu'ils ont besoin l'un de l'autre.

Les nuages de molécules

Plus d'une centaine de molécules diverses et de radicaux (atomes ou molécules dont le nuage électronique possède au moins un électron non apparié, ce qui les rend généralement très réactifs) ont été identifiés dans l'Univers, aussi bien minéraux qu'organiques, certains étant déjà fort complexes (alcools et éthers). J'en reparlerai dans la partie " *Conséquences* " de ce livre, dans les chapitres consacrés à l'origine de la vie sur la Terre à partir du cosmos.

Enfin, il faut signaler la présence dans l'espace interstellaire de HAP (25) (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, PAH pour l'acronyme anglo-saxon), qui sont des molécules organiques constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques condensés (cycles benzéniques) d'où leur nom. Il s'agit d'une nouvelle composante de cette matière interstellaire qui pourrait être particulièrement abondante et dont l'existence n'est pas vraiment une surprise, puisque l'on sait qu'à chaque nouvelle génération d'étoiles la matière se complexifie. Le milieu interstellaire s'enrichit progressivement mais sûrement d'éléments lourds, et la composition chimique initiale évolue avec le temps. Les HAP, qui sont de grosses molécules comportant de 20 à 200 atomes, jouent probablement un rôle essentiel dans toute la physique et la chimie de la matière interstellaire. On se demande, bien sûr, si elles ont joué un rôle dans l'apparition de la vie, la présence de carbone étant un a priori favorable.

Une autre source d'énergie invisible : l'antimatière

L'existence de l'antimatière dans l'Univers est soupçonnée depuis longtemps (26), le problème pour les astrophysiciens étant de la mettre en évidence sans ambiguïté. Là encore le satellite *GRO* a étonné en permettant d'une manière indirecte l'identification d'un gigantesque *nuage d'antimatière* près du centre de la Galaxie (27).

Cette antimatière a été trahie par son association étroite avec des émissions de rayons gamma observées par l'un des instruments de *GRO* appelé *OSSE* (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment). Les spécialistes ont expliqué que la signature à 511 keV est caractéristique de l'annihilation en une fraction de seconde des électrons et positons (anti-particule de l'électron) lorsqu'ils se rencontrent. Comme nous vivons dans un univers de matière et non d'antimatière, celle-ci ne se laisse que très difficilement détecter, mais même si elle a un caractère terriblement éphémère, les accélérateurs de particules modernes arrivent à en produire en petite quantité.

L'antimatière est source de violence et le centre de la Galaxie paraît être un lieu particulièrement bien approprié pour la trouver. Les spécialistes pensent pouvoir associer l'origine des signaux enregistrés par *OSSE*, même si la localisation très précise de la source prête un peu à la polémique, avec la fameuse radiosource compacte (d'un diamètre de 20 UA seulement) *Sagittarius A*, qui émet principalement en radio, mais également en infrarouge en X et en gamma, et qui est l'une des plus puissantes du ciel malgré son éloignement (30 000 années lumière). Pour cette radiosource, la quasi-totalité des spécialistes privilégient l'hypothèse du trou noir super massif situé très près du centre de gravité de la Galaxie et dont la masse pourrait approcher les trois millions de masses solaires. Mais rien n'est définitif. Quelques chercheurs préfèrent l'hypothèse de l'explosion d'une supernova géante (cachée des regards terrestres par l'épaisseur de la matière interstellaire dans la direction du Sagittaire) pour expliquer les émissions de rayons gamma et d'antimatière. Ce qui est sûr c'est qu'il est presque obligatoire que des explosions d'étoiles de l'envergure des supernovae produisent de l'antimatière, tout au moins provisoirement.

Dans le cadre de la théorie de l'impactisme, on se pose la question suivante : " *Quelles seraient les conséquences de la rencontre du Système solaire avec un nuage constitué d'antimatière ?* " Certains modèles laissent à penser qu'une telle rencontre pourrait avoir lieu tous les 100 MA. Cette collision matière/antimatière devrait engendrer une source intense de rayons X et gamma, avec évidemment une aggravation considérable de l'irradiation subie par la Terre (et les autres planètes). Avec en fait les mêmes conséquences que d'habitude. L'antimatière est un moyen de créer la violence par l'intermédiaire des rayonnements X et gamma, mais c'est tout. Mais nous en sommes encore au niveau 1 de l'hypothèse qui s'apparente vraiment à un scénario de science-fiction.

Rencontre possible avec un nuage interstellaire

La possible interaction entre le Système solaire et certains nuages interstellaires a été étudiée dès 1939 (28) par deux astrophysiciens britanniques bien connus, Fred Hoyle (1915-2001), alors âgé de 24 ans seulement, et Raymond Lyttleton (1911-1995). Dès cette époque, ils avançaient comme conclusion à leur étude qu'une telle rencontre pourrait modifier les conditions climatiques de la Terre, avec les conséquences biologiques qui en découlent.

Il est évident que de telles rencontres sont chose courante à l'échelle astronomique, dans la mesure où notre Système solaire est proche de l'axe médian de la Galaxie et qu'il fait autour du centre de gravité de celle-ci une révolution en 240 ou 250 MA.

L'existence d'un gaz et d'une poussière interstellaire a été mise en évidence au début du XX^e siècle. L'astrophysicien Johannes Hartmann (1865-1936), en effet, a pu observer dans les spectres d'émission de certaines étoiles des raies d'absorption qui s'expliquaient par la présence d'un écran diffus de matière interstellaire froide entre ces étoiles et la Terre. Plusieurs générations d'astrophysiciens durant tout le XX^e siècle ont déterminé progressivement la composition de ce milieu interstellaire et plus d'une centaine de molécules ont pu être identifiées.

L'une des premières remarques faites est que le milieu interstellaire est inhomogène, dans la mesure où les analyses spectroscopiques donnent des résultats très différents selon la direction observée. Cela signifie que la grande part de la matière est concentrée dans des nuages interstellaires plus ou moins vastes et irréguliers, la majorité se trouvant dans le plan médian de la Galaxie. Comme prévu, l'hydrogène est l'élément essentiel, mais on y trouve également, en proportions variables selon les nuages, de nombreux autres éléments et une quantité plus ou moins importante de poussière. Les nuages sont plus ou moins ionisés, suivant le flux ultraviolet dispensé par les étoiles voisines. On pense que la densité des nuages interstellaires est de l'ordre de 10 à 10 000 particules par cm³ et que leur température ordinaire est voisine de 50 K, c'est-à-dire une température très froide.

Les dimensions des nuages interstellaires observés sont extrêmement variables, allant de 3 ou 4 années lumière pour les plus petits à plusieurs centaines d'années lumière pour les plus grands. On se rend donc bien compte que le Système solaire peut parfois baigner dans un nuage pendant plusieurs milliers d'années.

La question que se sont posé les astrophysiciens est donc celle-ci : " *Y a-t-il un nuage interstellaire proche de nous et quand se fera la prochaine rencontre ?* ". Hoyle, dans la foulée de son travail de pionnier de 1939, a écrit un célèbre roman de science-fiction sur le sujet, *Le nuage noir* (29), dans les années 1950, mais il semble bien, en fait, que le Système solaire (et surtout

la Terre) soit à l'abri d'une telle mauvaise rencontre pour les quelques milliers d'années à venir.

Certains astrophysiciens, suite aux observations faites par le satellite *Copernicus* dans les années 1970, ont cru pouvoir indiquer la présence proche d'un tel nuage interstellaire (30/31). L'hydrogène étant de loin l'élément principal du milieu interstellaire, on a essayé de calculer sa quantité totale intégrée le long de lignes de visée dans différentes directions par la trace laissée dans les spectres d'absorption (raies Lyman α). Cette densité moyenne de l'hydrogène dans la direction d'une dizaine d'étoiles proches situées de 1 à 80 années lumière est voisine de 0,02 atome/cm³ seulement, contre 0,1 atome/cm³ dans le Système solaire.

On considère que l'existence d'un "nuage" devient réelle à une densité critique de 0,4 atome/cm³ à une distance de 0,3 année lumière du Soleil. Les astronomes pour leur (pseudo-) nuage *proche* privilégient la direction du Scorpion dans laquelle ils ont détecté la présence bien réelle, elle, d'un grand nuage interstellaire dont la densité serait de l'ordre de 10 000 atomes par cm³ et l'épaisseur de 0,05 parsec.

Hoyle et Lyttleton ont noté que lorsqu'un nuage traverse le Système solaire, il subit une importante attraction gravitationnelle de la part du Soleil. Celui-ci est alors en mesure de capter à sa surface une partie de la matière opaque du nuage. L'importance de la matière capturée croît avec la densité du nuage et décroît avec la vitesse relative par rapport au Système solaire. Ces deux savants ont montré que ce phénomène peut s'accompagner d'une modification de la luminosité solaire, modeste mais suffisante pour affecter le climat de la Terre.

Certains chercheurs pensent que seuls des nuages très denses (densité de 100 000 particules/cm³) peuvent réellement affecter le climat, surtout du fait de l'écran partiel existant entre le Soleil et la Terre. D'autres sont d'un avis contraire, estimant qu'une densité de 100 à 1000 particules/cm³ suffirait à faire écran au vent solaire. Cette fourchette paraît quand même bien faiblarde. On a calculé que pour une densité de 1000 atomes par cm³ et une vitesse de 20 km/s, conditions considérées comme moyennes et nullement exceptionnelles, la Terre balaierait chaque seconde 10²⁸ (10 milliards de milliards) d'atomes, réunis sous forme de grains de silice ou de graphite de quelques millièmes de millimètre de diamètre. La collecte pourrait atteindre une petite dizaine de tonnes par an et cela durant plusieurs milliers d'années. La présence d'un nuage interstellaire, même très ténu, pourrait (donc a pu dans le passé) modifier l'effet de serre et provoquer un refroidissement sensible de la Terre avec pour conséquence une période de glaciation.

D'une manière plus globale, les astronomes pensent que trois conséquences principales peuvent résulter de l'arrivée d'un nuage interstellaire dans notre secteur spatial :

- une modification de la composition des couches externes du Soleil du fait de l'apport d'éléments plus lourds (enrichis) ;
- une modification de l'abondance du deutérium dont le rôle est important dans les problèmes liés à la physique nucléaire, et donc une modification du rapport D/H (deutérium/hélium) qui a des conséquences directes sur la nature de l'Univers (univers ouvert ou fermé) ;
- une modification de la composition des comètes par l'accrétion à celles-ci de matière interstellaire.

Même si l'arrivée d'un nuage interstellaire de bonne taille n'est pas à l'ordre du jour à l'échelle humaine, il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit d'un phénomène astronomique banal et fréquent à l'échelle astronomique. Et surtout, rien n'empêche l'existence de mini-nuages de quelques heures lumière, trop petits pour être détectés, qui pourraient s'avérer tout aussi dangereux (à l'échelle humaine) que les gros dont l'action s'évalue à l'échelle astronomique.

Ces mini-nuages pourraient se présenter sous la forme de poches de matière et de gaz liés entre eux disséminées dans toute la Galaxie et devenues autonomes à la suite de la scission avec un nuage classique. Ces mini-nuages qui se situaient obligatoirement à la périphérie du nuage interstellaire auraient obtenu leur autonomie à la suite de perturbations stellaires qui les auraient définitivement séparé du nuage parent.

Quand on réfléchit sérieusement à la question, on se rend compte que de telles poches de gaz et de poussière autonomes, qui présentent les mêmes caractéristiques physiques que leur corps-parent, doivent être légion dans notre Galaxie (et aussi dans les autres). Plus petits et donc plus nombreux, c'est la règle dans l'Univers, et en principe indécélables de la Terre, sauf s'ils sont très proches et relativement denses. C'est la raison pour laquelle l'hypothèse de l'existence d'un mini-nuage proche dans la direction du Scorpion, et peut-être même originaire du grand nuage interstellaire du Scorpion, est loin d'être absurde.

En fait, le Système solaire peut être très souvent traversé par de petits nuages, parfois suffisamment denses pour diminuer quelque peu la chaleur du Soleil. On est en droit de se demander si quelques variations repérées dans le calendrier climatologique de l'Antiquité, et même dans un passé plus lointain des mini-glaciations non totalement expliquées d'une manière satisfaisante par la théorie de Milankovic, ne relèvent pas d'un tel phénomène.

Ces mini-nuages sont l'un des acteurs de l'impactisme invisible et peuvent jouer épisodiquement un rôle perturbateur au niveau de la biosphère et peut-être même, comme nous le verrons, avoir un rôle dans le "bruit de fond" des extinctions et accessoirement dans la panspermie microbienne.

L'explosion de supernovae proches

Aujourd'hui, une supernova est emblématique de la violence de l'Univers, et à juste titre. A son maximum d'éclat elle peut devenir aussi lumineuse que la galaxie dont elle est un membre anonyme en temps ordinaire. Sa luminosité est au paroxysme du phénomène environ 10 milliards de fois celle du Soleil. L'énergie libérée est colossale, de l'ordre de 10^{44} à 10^{46} joules (sans aucune comparaison avec des phénomènes générés ordinairement par une étoile comme le Soleil), et la matière est éjectée avec une vitesse de plusieurs milliers de km/s.

Il est donc logique que l'une des causes les plus souvent invoquées pour donner consistance à la théorie de l'impactisme invisible est l'explosion de supernovae proches (quelques dizaines d'années lumière). Qu'en est-il exactement ? Vu leur extraordinaire intérêt, les supernovae sont l'un des sujets d'étude préférés des astrophysiciens (32/33), mais on sait qu'elles sont rares à l'échelle humaine, et plusieurs générations d'astronomes (depuis l'époque de Kepler en 1604) ont dû s'en passer. Seules de nombreuses supernovae extragalactiques ont été observées depuis la fin du XIX^e siècle, mais comme elles sont très lointaines (plusieurs millions d'années lumière), elles restent peu spectaculaires et même ignorées en dehors du cercle restreint des astronomes.

L'explosion de celle de 1987, même si elle a eu lieu dans le Grand nuage de Magellan, a donc été une véritable aubaine pour la communauté astronomique, et elle a été suivie avec passion dans tous les observatoires (34). Elle a permis aux spécialistes d'affiner leurs modèles théoriques.

Les historiens de l'astronomie ont répertorié seulement huit supernovae galactiques depuis 2000 ans, ce qui est très peu. Elles ont explosé en 185, 386, 393, 1006, 1054, 1181, 1572 et 1604. Aucune n'était réellement proche, semble-t-il, donc on n'a aucune trace terrestre de ces événements, si ce n'est leur mention en tant que "étoiles hôtes" dans les textes chinois. Celle de 1006, dans la constellation du Scorpion, fut particulièrement spectaculaire, son éclat atteignant celui "d'un quart de lune". Elle fut également observée par les Arabes et les Européens et alarma évidemment les populations totalement incapables d'expliquer la présence de cette étoile extraordinaire autrement que par un signe de Dieu. D'autant plus, paraît-il, que cette apparition miraculeuse fut contemporaine de calamités (mais à cette époque, les calamités étaient quasi permanentes). Et heureusement encore que le fameux an 1000 était déjà passé depuis quelques années...

Pour le passé relativement proche, on connaît les restes de l'explosion d'une supernova qui a dû être très spectaculaire, celle connue sous le nom de *Vela X*, dans la constellation australe des Voiles. En 1968, on a découvert l'un des premiers pulsars qui se trouve lié à cette étoile détruite. Ce pulsar a la particularité d'être très rapide (10 impulsions par seconde), ce qui prouve que l'explosion est récente (11 000 ans environ), dans la mesure où la vitesse des pulsars diminue avec le temps. Ainsi celle du pulsar du Crabe est de

33 tours par seconde (une impulsion correspond à une rotation complète) et elle diminuerait continuellement de 36 milliardièmes de seconde par jour. La supernova de Vela est associée à une nébuleuse spectaculaire et tentaculaire, produit de la dispersion de la matière de l'étoile originelle. Elle est connue sous le nom de *nébuleuse Gum*, du nom de l'astronome australien Colin Gum (1924-1960) qui l'a décrite le premier avec précision. Son extension atteint 35°, si bien que les filaments externes pénètrent dans la constellation voisine de la Poupe. On pense qu'elle est apparue environ 9000 ans avant J.-C. et que l'étoile mère était située à environ 1500 années lumière (distance du pulsar rescapé donc). J'en reparlerai dans le chapitre "*Fausses pistes*", car elle a été à la base d'une hypothèse fantastique basée sur des critères historiques troublants.

Les astronomes d'aujourd'hui sont bien conscients que la menace présentée par les supernovae, en fait, dépend uniquement des rayonnements de courte longueur d'onde (X et gamma) et plus encore des rayons cosmiques éjectés par l'étoile durant le cataclysme. Il est pratiquement certain qu'une grande partie de ces derniers sont des sous-produits de l'explosion de supernovae galactiques, mais aussi extragalactiques. Nous avons vu que les protons sont les constituants essentiels (90 %) des rayons cosmiques. Chacun de ceux-ci peut avoir une énergie d'une quinzaine de joules et leur nombre, sans être illimité, est très impressionnant par son nombre de zéros. On a calculé qu'une supernova explosant à 30 années lumière détruirait une partie substantielle de la couche d'ozone, ce qui serait embêtant pour les locataires de la biosphère, mais l'explosion d'une supernova *si proche* n'arrive que très rarement à l'échelle du million d'années. En fait, le danger existerait uniquement lors de périodes d'inversion géomagnétique.

Les supernovae ne constituent pas vraiment un danger dans le futur proche de la Terre, dans la mesure où il n'y a pas d'étoiles voisines candidates à l'explosion, même si ce thème est parfois utilisé dans des romans de science-fiction (35). Pour devenir supernova à la fin de sa vie, une étoile doit avoir une masse supérieure d'au moins 20 % à celle du Soleil, ce qui correspond à une luminosité absolue environ dix fois supérieure. Sirius, notre proche voisine la plus massive, n'est pas un danger avant plusieurs centaines de millions d'années, même si sa masse de 2,2 masses solaires la prédispose à devenir un jour (très lointain) supernova.

Pour avoir une comparaison utile, les astronomes ont calculé que Sirius supernova serait 5000 fois plus lumineuse que la Pleine Lune, mais elle resterait encore 100 fois moins lumineuse que le Soleil. Une supernova explosant à 30 années lumière aurait un éclat encore égal à près de 300 fois la Pleine Lune. Pour avoir l'éclat de la Pleine Lune, une supernova devrait exploser à 500 années lumière. On voit donc que la prochaine supernova galactique n'a que peu de chance de briller au firmament autant que la Lune, mais les astronomes s'en satisferont quel que soit son éclat.

Au chapitre 16, je raconterai l'histoire de *Geminga*, dont on a compris le mécanisme dans les années 1980, après une longue période d'incertitude,

due à la difficulté de mettre en évidence une contrepartie optique à la source gamma, très intense, repérée en 1972 dans les Gémeaux. Il s'agit d'une supernova qui a explosé à 100 années lumière de la Terre, il y a environ 350 000 ans. Elle pourrait avoir eu une incidence sur l'évolution de certaines espèces terrestres.

Pour terminer cette section sur les supernovae, on peut dire qu'elles ne présentent pas de danger en tant que telles. Seuls les rayonnements issus de l'explosion, et surtout les rayons cosmiques, pourraient nous causer des misères, mais uniquement lors d'inversions géomagnétiques. Comme je l'ai dit souvent, la magnétosphère est notre bouclier et elle fait fort bien son travail.

Notes

1. Je rappelle que le *maxwell* (symbole Mx) est l'unité de flux du système électromagnétique CGS et que le *hertz* (symbole Hz) est l'unité de fréquence (1 Hz est la fréquence d'un phénomène dont la période est de 1 seconde).
2. *Naissance de la radioastronomie* (ouvrage collectif), Les Cahiers de la Science, HS 8, 1992.
3. *L'astronomie de l'invisible* (ouvrage collectif), Sciences et Avenir, HS 33, 1980.
4. H. Breuer, *Atlas de la physique* (Livre de Poche, coll. La Pochothèque, 1997). Titre original : *Atlas zur physik* (1987). Une mine de renseignements pour les non-spécialistes.
5. J.-P. Dufour, *Sur la trace des phénomènes les plus violents de l'Univers*, Le Monde, p. 24, 25 avril 1997.
6. Y. Nazé, *Les couleurs de l'Univers* (Belin, 2005). Un excellent livre de vulgarisation sur les différents rayonnements provenant de l'espace.
7. B. Aschenbach, H.-M. Hahn and J. Trümper, *The invisible sky* (Verlag, 1998). Ce livre, sous-titré *Rosat and the age of X-astronomy*, raconte l'histoire du satellite allemand ROSAT, spécialisé dans l'étude des sources célestes de rayonnement X qui a permis la découverte de plus de 120 000 sources nouvelles.
8. Cet observatoire spatial, d'un poids de 17 tonnes, était équipé de quatre appareils d'observation différents, notamment d'un détecteur de rayons gamma appelé *Batse* (Burst And Transient Source Experiment) qui s'est avéré exceptionnellement efficace et utile pour le progrès de l'astrophysique.
9. J.-N. Capdevielle, *Les rayons cosmiques* (PUF, QS 729, 1984).

10. M. Crozon, *Quand le ciel nous bombarde : Qu'est-ce que les rayons cosmiques ?* (Vuibert, 2005). Un livre de référence sur un sujet qui reste assez mal connu.
11. J. Linsley, *Les rayons cosmiques de très haute énergie*, Pour la Science, 11, pp. 61-72, 1978.
12. J.-C. Pecker, *Sous l'étoile Soleil* (Fayard, 1984).
13. P. Lantos, *Le Soleil en face* (Masson, 1997). Un excellent livre sur le Soleil et sur les rapports Soleil-Terre, écrit par l'astrophysicien Pierre Lantos (1942-2007), que j'utilise comme référence principale. On se rend compte à sa lecture de l'extrême importance de la magnétosphère terrestre qui sert littéralement de paravent pour un grand nombre de radiations particulièrement dangereuses.
14. F. Baudin et S. Koutchmy, *La mission SoHO. Vers un nouveau Soleil ?*, L'Astronomie, 111, pp. 286-311, 1997.
15. Sciences et Avenir (collectif), *Soleil. Le destin d'une étoile*, HS 107, 1996.
16. A. Acker, *Astronomie. Introduction* (Masson, 1992).
17. R.-M. Bonnet, *Le Soleil, étoile variable*, Revue du Palais de la Découverte, 6, 58, pp. 24-43, 1978.
18. A. Boischot, *Le Soleil et la Terre* (PUF, QS 1233, 1966).
19. F. Lancel, *Lorsque le Soleil brûle... la Terre s'enflamme*, Le Parisien Libéré, p. 26, 18 février 1980.
20. P. Lantos, *Le Soleil* (PUF, QS 230, 1994). Ce livre a remplacé dans la collection *Que sais-je ?* le suivant : R. Michard, *Le Soleil* (PUF, QS 230, 1966).
21. Le 13 mars 1989, suite à une éruption solaire particulièrement violente, six millions d'Américains et de Canadiens furent privés d'électricité pendant neuf heures. Tout un réseau d'alimentation électrique disjoncta du fait de la détérioration de transformateurs liée à l'orage magnétique d'origine solaire. Cet événement a montré l'extraordinaire faiblesse d'une civilisation avancée comme la nôtre, totalement tributaire de la technologie.
22. J.-L. Steinberg et P. Couturier, *Le vent solaire*, La Recherche, 161, pp. 1494-1502, 1984.
23. P. Barthélémy, *Le Soleil frappe la Terre à la magnétosphère*, Le Monde, 1^{er} février 1997.
24. J. Crovisier et Th. Encrenaz, *Les comètes. Témoins de la naissance du Système solaire* (Belin - CNRS Editions, 1995 ; préface de R.-M. Bonnet).

25. A. Léger, *Une nouvelle composante de la matière interstellaire*, Science et Vie, HS 170, pp. 108-111, 1990.
26. M. Duquesne, *Matière et antimatière* (PUF, QS 767, 1982).
27. J.-F. Augereau, *Une fontaine d'antimatière s'écoule près de centre de notre Galaxie*, Le Monde, p. 21, 2 mai 1997.
28. F. Hoyle and E.A. Lyttleton, Proceedings of the Philosophical Cambridgian Society, 35, p. 405, 1939. Hoyle avait 24 ans seulement (il était né en 1915) quand il a eu cette idée du danger que représenterait un nuage de poussières cosmiques qui viendrait s'intercaler entre la Terre et le Soleil.
29. F. Hoyle, *Le nuage noir* (Dunod, 1962). Titre original : *The black cloud* (1957). C'est le premier roman de science-fiction écrit par le célèbre astrophysicien britannique, à partir de son idée de 1939.
30. A. Vidal-Madjar, J. Audouze, P. Bruston et C. Laurent, *Un nuage interstellaire à la rencontre du système solaire*, La Recherche, 80, pp. 616-622, 1977.
31. P. Kohler, *Les derniers jours du monde* (France-Empire, 1980).
32. Th. Montmerle et N. Prantzos, *Soleils éclatés, les supernovae* (Presses du CNRS, 1988).
33. J.-P. Luminet, *Les trous noirs* (Belfond, 1987).
34. D. Leglu, *Supernova* (Plon, 1989). L'histoire de la supernova de 1987.
35. F. Hoyle et G. Hoyle, *Inferno* (Denoël, 1976). Titre original : *The inferno* (1973). Dans ce roman, coécrit avec son fils Geoffroy Hoyle, Fred Hoyle a raconté l'histoire d'une supernova qui transforme la Terre en enfer par ses radiations, un double enfer de chaleur puis de glace.

CHAPITRE 9

L'ÉVÈNEMENT DE LA TOUNGOUSKA EN 1908

Un événement exceptionnel s'est produit le 30 juin 1908 (1) en Sibérie centrale (longtemps connu sous l'appellation inexacte et trompeuse de "*météorite*" de la *Toungouska* (2) et aujourd'hui sous celle de *événement de la Toungouska*) : la collision d'un corps céleste de bonne taille avec la Terre. Ce cataclysme a suscité depuis presque un siècle d'innombrables hypothèses et élucubrations, et il mérite bien que nous lui consacrons un chapitre entier de ce livre dans la partie "*Preuves*".

Cette collision est la meilleure et la plus irréfutable des preuves concernant la réalité actuelle de l'impactisme terrestre, théorie qui n'est pas seulement une vérité du passé comme ont voulu (et voudraient encore) le faire croire certains scientifiques (de moins en moins nombreux cela dit), qui ignorent tout ou presque du volet astronomique du problème. Depuis un siècle, la vie reprend ses droits sur le site et les traces visibles se font plus rares.

Les circonstances de la collision et les premières constatations

Le météore et la collision

L'objet (objet car son origine n'a jamais pu être déterminée d'une manière définitive avec certitude) de la Toungouska est tombé le 30 juin 1908, à 7h17mn11s heure locale (soit à 0h17mn11s TU), dans la vallée pierreuse de la rivière Toungouska, un affluent du Iénisséï, le grand fleuve sibérien. La localisation exacte de l'impact se situe à la latitude 60°55' nord et à la longitude 101°57' est, à 60 km de la petite ville de Vanavara et à environ 800 km au nord-ouest du lac Baïkal. Il s'agit d'une région boisée, marécageuse en été et gelée en hiver, pratiquement déserte dans la taïga sibérienne.

La matinée démarrait à peine quand un météore blanc-bleuté éblouissant, suivi d'une épaisse traînée de poussières beaucoup plus sombre, fut observé pendant quelques dizaines de secondes par de nombreux témoins, dans une très vaste région en forme de demi-cercle de plus de 700 km de rayon. Des simulations modernes ont permis de préciser plusieurs paramètres, notamment ceux concernant la magnitude du météore (3) vu de plusieurs villes et villages situés dans la zone d'observation.

A 90 km d'altitude, il était de magnitude -5, déjà magnifique, attirant l'attention des rares habitants de la région. A 75 km, la magnitude apparente était de -9, passant très rapidement à -13 à 60 km, puis à -18 à 45 km et à -22 à 30 km d'altitude. A cet instant, le météore était encore 100 fois moins

brillant que le Soleil, mais tous les témoins pressentaient déjà la catastrophe à venir. A 15 km d'altitude, il atteignit quasiment l'éclat du Soleil (-27), c'était un deuxième soleil dans le ciel, comme l'on raconté les témoins éberlués et terrorisés. Juste avant l'impact, au-dessus de Vanavara, la ville la plus proche, il atteignit la magnitude fantastique de -32, 100 fois la magnitude du Soleil, aveuglant les rares témoins qui suivaient encore sa course folle dans le ciel. Puis ce fut l'explosion finale, la désintégration, dans un paroxysme de bruit et de lumière, comme il ne s'en produit sur Terre qu'une fois tous les 500 ans peut-être.

Le météore, qui avait une trajectoire sud-est/nord-ouest, apparut au nord du lac Baïkal et survola le ciel sibérien jusqu'à 60 km au nord de Vanavara, avant d'exploser dans l'atmosphère, provoquant la lueur aveuglante dont nous avons parlé et des phénomènes acoustiques intenses, puisque des explosions sourdes furent entendues à des distances supérieures à 1000 km. Au-dessus du site de l'explosion, des flammes et un nuage de fumée, que des témoins comparèrent à une "fontaine de feu", furent observés montant vers le ciel à une hauteur supérieure à 20 km. Les Toungouzes, seuls et rares habitants de la région, crurent que c'est leur dieu du feu, *Ogdy* (4), qui tombait sur la Terre.

Dans de nombreux endroits de la région, le sol et les bâtiments tremblèrent comme pendant un violent tremblement de terre. A Vanavara, un souffle brûlant jeta des témoins à terre, brisa des vitres et provoqua des dégâts sévères dans les récoltes. Un peu plus au nord, les plus proches témoins (5) du drame, des nomades vivant sous la tente, furent littéralement balayés par cette formidable onde de choc et leurs tentes arrachées. Pourtant, comme il n'y avait pas, apparemment, d'habitants dans une aire de 30 km autour du point d'explosion, cette catastrophe extraordinaire n'a fait aucune victime humaine connue. Ce qui n'a jamais été confirmé d'ailleurs et qui reste à la fois étonnant et improbable. Seuls, paraît-il, un troupeau de rennes et probablement quelques autres animaux vivant dans la forêt de sapins, au-dessus de laquelle eut lieu l'explosion, furent anéantis par la chaleur ou le feu qui dévasta plusieurs centaines de kilomètres carrés de forêt.

La chute de l'objet de la Toungouska et l'explosion qui suivit causèrent une onde sismique importante. Celle-ci fut enregistrée à Irkoutsk, ville située à 893 km exactement de l'épicentre du lieu de l'explosion, 45 minutes et 6 secondes plus tard, se déplaçant à la vitesse classique de propagation des ondes aériennes, soit 330 mètres/seconde environ. L'onde sismique, qui fit le tour de la Terre, fut également enregistrée à Potsdam en Allemagne. Trois autres ondes sismiques moins importantes laissèrent aussi leur empreinte sur les appareils enregistreurs, elles seraient dues à des ondes aériennes d'explosion.

Les premières constatations

Parmi les premières constatations, faites tout de suite après le cataclysme (6), il faut encore citer un phénomène optique intéressant qui a été noté par de nombreux observateurs du ciel nocturne, ignorant tout de la chute du 30 juin. La première nuit suivant celle-ci, c'est-à-dire la nuit du 30 juin au 1^{er} juillet 1908, fut exceptionnellement brillante partout en Europe et en Sibérie occidentale. Dans le Caucase, dans le sud de la Russie, la nuit fut si claire qu'il était possible de lire à minuit sans l'aide d'une lumière artificielle. Les nuits suivantes furent encore nettement plus claires que la normale. Cet effet, dû à la dispersion d'un très abondant nuage de poussières abandonnées dans l'atmosphère avant ou pendant l'explosion par l'objet cosmique, diminua très lentement et dura pratiquement deux mois, jusqu'à la fin août. Corrélativement avec cette luminosité du ciel nocturne inhabituelle et anormale, les astronomes notèrent une importante diminution de la transparence de l'atmosphère qui gêna considérablement leurs observations.

Les diverses constatations concernant l'événement de la Toungouska amenèrent immédiatement les astronomes à formuler l'hypothèse la plus logique : notre Terre venait d'être frappée par une météorite gigantesque qui avait dû causer un cratère géant. Pourtant, chose absolument impensable de nos jours, aucune expédition ne fut organisée pour aller étudier sur place, sans attendre, les effets de la catastrophe. Au début du siècle, il est vrai, la Sibérie était encore "le bout du monde" et, apparemment, jusqu'en 1927, aucun scientifique soviétique ne put convaincre les autorités successives de financer une expédition digne de ce nom.

Les premières expéditions : l'étude de la région dévastée

La première expédition de 1927

La première expédition réellement scientifique (7) sur le site de la Toungouska eut lieu en 1927 seulement, dix-neuf ans après la catastrophe. Elle était conduite par le minéralogiste soviétique Leonid Kulik (1883-1942), sommité de l'époque dans le domaine des météorites. Plusieurs surprises attendaient les chercheurs des diverses disciplines de l'expédition. D'abord ils trouvèrent une zone de 60 km de diamètre complètement dévastée par l'onde de choc balistique. Tous les arbres de la forêt préexistante avaient été soufflés, arrachés par les racines qui étaient dirigées vers l'épicentre du cataclysme. Un tel arrangement radial montrait, sans erreur possible, que la chute avait été accompagnée d'une explosion extrêmement violente. L'onde de choc a été maximale latéralement, puisque la région nord-est a été la plus touchée.

Dans la partie centrale de la zone d'impact existait une dépression marécageuse de plusieurs kilomètres carrés où les chercheurs notèrent une

centaine de petites cavités peu profondes de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. Ils les prirent d'abord, à tort, pour des cratères météoritiques car Kulik pensait que l'explosion avait entraîné une fragmentation complète de l'objet cosmique originel, et donc une pluie météoritique de nombreux fragments de toutes les tailles. En fait, il fut établi plus tard que toutes ces formations étaient des fondrières naturelles, très nombreuses dans cette région qui, nous l'avons dit, a la particularité d'être marécageuse durant la période chaude et évidemment d'être gelée l'hiver.

Autre surprise de taille, et une grosse déception pour les membres de l'expédition, ils ne découvrirent *aucune météorite*, exception faite de quelques infimes poussières, et cela malgré un ratissage sérieux et méthodique de la région sinistrée. Ils durent se rendre à l'évidence : contrairement à l'opinion première de Kulik, l'objet cosmique n'avait pas touché le sol, même sous forme de petits fragments. Cet objet n'était donc pas une météorite, au sens propre du terme, c'est-à-dire un objet ferreux ou pierreux qui aurait dû laisser au moins quelques fragments significatifs. L'hypothèse de la comète semblait donc s'imposer, avec une explosion et une désintégration dans l'atmosphère et non un véritable impact.

Les expéditions de 1928, 1929-1930 et 1938-1939

Deux autres expéditions sur le site eurent lieu en 1928 et en 1929-1930 (8), cette dernière fort importante puisqu'elle dura plus d'un an. Elles n'apportèrent rien de très nouveau. On creusa plusieurs des dépressions que Kulik croyait encore être des cratères météoritiques, mais sans succès. L'une d'entre elles fut explorée très soigneusement, jusqu'à 34 mètres de profondeur. Devant le résultat totalement négatif, il fallut accepter l'origine naturelle de ces fondrières.

Enfin, en 1938-1939, une couverture photographique aérienne très complète de la région fut effectuée, permettant de connaître d'une façon précise le plan de la région touchée et de constater les extraordinaires dégâts, encore nettement reconnaissables bien que datant déjà de trente ans. Ces photos ont fait le tour du monde et illustrent encore tous les livres qui parlent en détail de l'événement de la Toungouska.

Ces quatre expéditions permirent donc d'exclure définitivement l'hypothèse de *l'impact au sol* d'un astéroïde planétaire. Elles confortèrent la majorité des scientifiques dans une nouvelle hypothèse assez plausible a priori, celle de *l'explosion dans l'atmosphère* du noyau d'une petite comète active. Cette hypothèse cométaire fut proposée dès 1930, après les premières expéditions sur le site, par Francis Whipple (1876-1943) (9) et confirmée en 1933 par Igor Astapovich (1908-1976). Cependant, l'étude de la composition des comètes était encore bien peu avancée à l'époque, et il était impossible de démontrer d'une façon certaine que ce type d'objets célestes est capable de provoquer les divers effets observés pendant et après l'explosion.

L'incertitude des savants sur la nature exacte de l'objet responsable de cette catastrophe, frappante pour les imaginations, surtout après la publication de photographies révélatrices de la puissance de l'explosion, allait entraîner l'apparition de très nombreuses hypothèses plus ou moins (souvent moins que plus) plausibles. Nous en dirons quelques mots en conclusion de ce chapitre.

Les points d'accord dans une controverse serrée

Trois hypothèses plausibles en concurrence

De nos jours, près d'un siècle après le cataclysme sibérien, la controverse sur la nature exacte de l'objet responsable reste vive (10), même si l'on semble s'acheminer vers une solution imprévisible il y a vingt ans, plus complexe que tous les spécialistes qui ont étudié la question pouvait l'envisager.

En effet, la solution qui semble s'imposer est celle-ci : la désintégration dans l'atmosphère d'un fragment astéroïdal de l'ancien centaure Hephaistos (mi-comète, mi-astéroïde, c'est-à-dire un objet mixte, je le rappelle), et dont l'existence explique la majorité des événements concernant l'impactisme terrestre récent. L'astronome slovaque Lubor Kresak (1927-1994) (11) avait déjà trouvé une partie de la vérité dans les années 1970 en montrant que l'objet de la Toungouska, connu maintenant également sous le nom d'Ogdy, était lié à la *comète* P/Encke. On comprend que les astronomes ne pouvaient se mettre d'accord, puisque pour les uns il ne pouvait s'agir que d'une comète, alors que les autres démontraient le caractère astéroïdal du fragment désintégré.

Pendant trois quarts de siècle, trois hypothèses furent très logiquement en concurrence : celle du vrai *astéroïde*, celle du *noyau cométaire* et celle de la *comète active*. Ces trois hypothèses ont eu (et ont encore) leurs partisans et restent d'ailleurs les seules réellement envisageables. Bien entendu, chacune a été étayée de nombreux arguments, disséquée, analysée, confirmée (!) par des simulations multiples et parfois convaincantes (mais une simulation convaincante n'est pas forcément le reflet de la réalité). Jusqu'à présent aucune d'entre elles ne s'était vraiment imposée, faute de connaître et de prendre en compte l'histoire et la nature de Hephaistos, car toutes les trois présentent des insuffisances et des faiblesses plus ou moins sérieuses. Seul le *mixage* des trois est concluant.

Les points d'accord

Avant d'étudier séparément ces trois hypothèses, examinons les points d'accord. D'abord, il faut insister sur le fait que, pratiquement, tout le monde est d'accord pour admettre que le cataclysme est dû à la collision d'un objet appartenant au Système solaire, et que les hypothèses de l'antimatière et du mini trou noir (voir plus loin) ne sont que des hypothèses d'école.

Un point important est celui de la masse de l'objet et de la puissance de l'explosion. Toutes les valeurs entre 10^{14} joules et 8×10^{17} joules ont été avancées pour cette dernière, depuis la première estimation d'Astapovich en 1933, mais on penche aujourd'hui pour une valeur intermédiaire proche de 5×10^{16} joules. Ce résultat important a été obtenu (12) après une nouvelle analyse des anciens sismogrammes enregistrés le 30 juin 1908, et d'autres données, relatifs à l'événement et de leur comparaison avec les effets sismiques et acoustiques concernant les explosions nucléaires aériennes des années 1945-1965, dont les paramètres sont connus avec précision. L'énergie libérée par la catastrophe de la Toungouska correspond à une explosion de 12,5 mégatonnes de TNT, soit en gros 600 fois la puissance de la bombe d'Hiroshima.

Pour la masse, les valeurs ont été fixées dans une très large fourchette, entre 10 000 et 1 million de tonnes. Mais là encore, les recherches dans les années 1960-1970 ont sensiblement clarifié la situation. Une valeur approximative de 500 000 tonnes pour la masse préatmosphérique semble fort raisonnable et elle est maintenant généralement acceptée par les spécialistes actuels. Par contre, évidemment, le désaccord a longtemps été total *pour le diamètre* de l'objet de la Toungouska, puisqu'il dépend de la densité retenue, très variable selon la nature de l'objet, même si l'on sait de nos jours que les densités les plus faibles envisagées ne sont pas crédibles à la lumière des connaissances actuelles, et que seules les densités planétaires (3,0 et supérieures) sont réellement acceptables.

Une autre certitude, et donc un point d'accord total entre les spécialistes, est que l'objet n'a pas touché le sol et a explosé dans l'atmosphère entre 5 et 10 km d'altitude. Il s'agit donc d'une explosion *basse*, ce qui est un très mauvais point pour l'hypothèse cométaire, comme nous le verrons.

Le problème de l'orbite préatmosphérique de l'objet de la Toungouska, particulièrement ardu pendant cinquante ans, s'est un peu éclairé à partir de 1960 avec l'utilisation des ordinateurs pour le calcul des différentes possibilités. Car il ne faut pas oublier l'extrême complexité du problème, compte tenu du fait que les observations en 1908 n'ont pas excédé quelques dizaines de secondes. Tout ce que l'on sait, c'est que l'angle de la trajectoire du bolide avec la surface terrestre était de 10° environ seulement, et que la distance angulaire entre le bolide et le Soleil était également fort petite. C'est ce qui explique que l'objet cosmique n'ait pas été observé plus tôt : il était pratiquement indécélable pour un observateur terrestre (13), perdu dans le rayonnement solaire.

Les premiers calculs sérieux, dans les années 1930 ont tous montré, étonnamment, que l'orbite du bolide était probablement rétrograde et que l'objet devait être une comète à longue période. Astapovich envisageait une vitesse géocentrique comprise entre 50 et 60 km/s, et localisait le radiant du bolide vers l'apex de la Terre. Mais l'ordinateur a remis les choses en place grâce à des simulations, et de rétrograde, l'orbite la plus probable est devenue *directe*, ce qui rend toutes leurs chances aux objets *planétaires* (qui

n'ont jamais d'orbite rétrograde). On penche actuellement pour une vitesse géocentrique de l'ordre de 30 km/s, qui est celle des objets à forte excentricité, mais qui peut concerner aussi bien une comète qu'un astéroïde.

Au sujet de l'orbite intra-atmosphérique, il faut démentir les bruits qui ont longtemps couru sur le fait que l'objet de la Toungouska aurait eu une trajectoire erratique et qu'il aurait fait "un coude" au-dessus de l'Europe centrale (de la Bohême plus précisément). Rappelons que le bolide durant son court passage dans l'atmosphère n'a pas été observé en Europe et qu'il est apparu au nord du lac Baïkal, avec pour seuls témoins les populations de la Sibérie centrale. Les pseudo-observations européennes ont été annoncées après coup et furent le fait de mythomanes en mal de publicité.

Végétation post-catastrophe et mutations possibles

Enfin, il faut signaler deux constatations datant des années 1970 fort intéressantes (mais qui semblent aujourd'hui contestées par les chercheurs occidentaux qui n'ont pas eu accès au site avant les années 1980). Des chercheurs soviétiques ont découvert avec surprise que certains végétaux qui poussent aujourd'hui dans le périmètre de la région sinistrée en 1908 ont une vitesse de croissance très sensiblement supérieure à la normale. Elle serait de l'ordre de 5 à 10 fois plus rapide que dans les régions voisines non sinistrées, et que dans des cultures de contrôle surveillées par les chercheurs. Ceux-ci ont fait des vérifications sur près de 200 espèces différentes de plantes diverses pour comparer les dosages d'oligo-éléments. Cette nouvelle végétation "post-catastrophe" s'est avérée anormalement riche en arsenic, iode, brome, zinc et tellurium. Les savants soviétiques ont expliqué ce résultat surprenant, lié sans doute possible à la diffusion du matériel pulvérisé lors de l'explosion, par l'*enrichissement* du sol dû aux éléments chimiques cités plus haut et qui étaient obligatoirement présents dans l'objet cosmique avant sa désintégration.

Deuxième constatation à retenir, il semble que les savants soviétiques aient eu la preuve que des mutations soient également apparues sur plusieurs espèces d'insectes qui ont repeuplé la région sinistrée. Ces mutations (si elles sont réelles car là aussi il y a doute) ne peuvent être liées qu'à l'augmentation de la radioactivité locale. Au fond, ce ne serait pas vraiment une surprise, car on sait depuis longtemps qu'une radioactivité accrue débouche presque obligatoirement sur des mutations génétiques parmi la faune et la flore. On ne peut que regretter vivement le temps perdu entre 1908 et 1927, car une étude poussée immédiatement dans les années post-catastrophe aurait permis de lever cette ambiguïté et ce doute qui sévissent aujourd'hui.

Après ces points d'accord, nous allons voir les trois hypothèses concernant la nature de l'objet de la Toungouska. Car au-delà d'un consensus relatif sur certains points, il ne faut pas se cacher que les raisons de désaccord entre les différents spécialistes de toutes les disciplines concernées restent profondes, et que l'on ne peut que difficilement envisager une "théorie" qui

aurait l'assentiment de tous. Nous resterons encore longtemps au niveau des "hypothèses", même si celle du fragment *planétaire* issu de Hephaistos paraît nettement la plus probable.

L'hypothèse de la comète active

L'hypothèse cométaire pour l'objet de la Toungouska a toujours été en faveur depuis les travaux de Francis Whipple en 1930 et plus tard ceux de Vassili Fesenkov (1889-1972). Il faut dire que de nombreux indices militent en sa faveur (14/15), mais sa cote a continuellement baissé depuis 1960 avec les premières simulations sur ordinateur qui ont montré qu'une orbite directe était la plus probable.

L'étude d'une collision entre la Terre et une comète a, comme tout le reste, été faite sur ordinateur (16), avec des scénarios différents concernant la masse, la vitesse et les conditions d'approche de la comète. Dans tous les cas de figure, il apparaît qu'une telle collision ne produit pas de cratère car *l'objet ne touche pas le sol*, mais sa désintégration totale provoque une explosion dans l'atmosphère, capable de carboniser une forêt sur plusieurs kilomètres carrés et sur une déflagration audible à plus de 1000 km comme on l'a vu en Sibérie en 1908. La tête de la comète s'échauffe d'une façon fantastique en très peu de temps (quelques secondes) en traversant l'atmosphère terrestre à une vitesse de 20 km/s (une telle vitesse équivaut à 66 fois la vitesse du son dans l'air, soit une vitesse de Mach 66 (17)) et la température peut atteindre plusieurs millions de degrés. C'est insuffisant cependant pour que s'amorcent des réactions nucléaires, mais l'explosion est loin d'être sans effets (18). D'une part, la tête de la comète se volatilise en moins de dix secondes en milliards d'éclats infinitésimaux et d'autre part, il y a production de rayonnements X et gamma et de particules accélérées, électrons et neutrons. Tout cela s'est trouvé confirmé en Sibérie.

Des micro-sphérules par millions dans la zone d'impact

Lors de campagnes sur le terrain en 1958 et 1961, menées avec du matériel sophistiqué (notamment des appareils enregistreurs très sensibles), sous la direction du météoricien soviétique Evgeny Krinov (1906-1984), on a découvert de très nombreuses micro-sphérules de silicates (d'un diamètre de 80 à 100 micromètres) ayant la structure et la composition des chondrites carbonées, que l'on soupçonne être des vestiges de noyaux cométaires.

On a également trouvé des particules de magnétite (oxyde de fer magnétique) et des billes microscopiques d'aspect vitreux contenant des vacuoles remplies de gaz carbonique ou de sulfure d'hydrogène. Il y en a, à coup sûr, plusieurs milliers de tonnes éparpillées dans toute la zone sinistrée en 1908. Tout cela postule, bien sûr, pour l'origine cométaire.

Quant à la production de rayonnements nucléaires et à l'augmentation présumée de la radioactivité à la surface terrestre en 1908 et 1909, elles ont connu une éclatante confirmation, grâce notamment à la méthode

dendrochronologique. On a, en effet, constaté pour cette époque une augmentation voisine de 1 % par rapport à la normale de la quantité de carbone 14 contenue dans les arbres coupés et étudiés sur tous les continents (19). On est obligé d'attribuer cette augmentation de la radioactivité terrestre en 1908-1909 à l'objet de la Toungouska, car il n'y a pas eu d'activité solaire anormale à cette époque qui aurait pu être responsable du phénomène observé dans les anneaux de croissance des arbres. Là encore, l'hypothèse d'une origine cométaire de la "bombe cosmique" explique bien cet afflux anormal de particules radioactives, ainsi que l'extraordinaire croissance observée dans la végétation de la zone choquée dont nous avons parlé plus haut.

Enfin, il ne faut pas oublier l'un des principaux arguments utilisés par les partisans de l'hypothèse cométaire : les fameux phénomènes lumineux, notamment l'extraordinaire luminosité du ciel nocturne durant plusieurs nuits. Ce phénomène serait dû au passage de la Terre à l'intérieur de la queue de poussières de la comète.

Dans l'hypothèse cométaire, il faut admettre un diamètre important pour l'objet de 1908. Pour une masse de 500 000 tonnes, qui est la plus raisonnable, combinée avec une densité de $1,0 \text{ g/cm}^3$ qui est celle de la glace, principal constituant des noyaux cométaires actifs, on obtient un diamètre approximatif de 100 mètres pour un objet sphérique. Mais certains chercheurs ont émis l'idée que la densité du noyau pourrait avoir été très faible, largement inférieure à $1,0 \text{ g/cm}^3$. Dans ce cas, le noyau n'aurait pas été un corps unique, mais plutôt un *essaim* (ou pseudo-noyau) de particules individuelles plus ou moins soudées entre elles. On cite deux valeurs à cet égard : une densité de $0,25 \text{ g/cm}^3$ qui correspond à un diamètre de 150 mètres et une densité minimale de $0,001 \text{ g/cm}^3$ qui correspond à un diamètre "géant" de 600 mètres. Disons tout de suite que seule la densité la plus forte : $1,0 \text{ g/cm}^3$ est plausible. Nous verrons pourquoi.

La possible association P/Encke - Ogdy

Plusieurs astronomes ont essayé d'associer l'objet de la Toungouska avec une comète à courte période connue. Dans les années 1930, on croyait possible une parenté avec la comète P/Pons-Winnecke qui s'est approchée à 0,039 UA de la Terre le 26 juin 1927, l'une des principales approches du XX^e siècle (20), et qui, selon certains, aurait pu se fractionner il y a quelques siècles en deux ou plusieurs fragments. Mais cette hypothèse ne reposait sur rien de sérieux et a été rapidement abandonnée. En 1978, Kresák a repris l'idée et a proposé une *association génétique* extrêmement intéressante avec la comète périodique P/Encke (21). Cet auteur, spécialiste bien connu des comètes, des astéroïdes et aussi des météores, s'est basé sur une similarité possible entre les deux orbites et surtout sur la coïncidence de la date de l'événement de la Toungouska (30 juin) avec celle de l'averse météorique des Bêta Taurides, qui a lieu le même jour et que l'on sait associée à P/Encke. Cette brillante hypothèse a pris progressivement de la consistance au cours

des années 1980 (22), mais elle a été vivement contestée car elle se heurtait à de grosses difficultés dont je vais parler plus loin.

A l'exposé des "forces" de l'hypothèse cométaire, on pourrait croire que tout est dit et que le doute n'est plus permis. Nous allons voir maintenant que tout n'est pas si définitif qu'il peut paraître aux non-spécialistes.

L'hypothèse du noyau cométaire

Une durée de vie active insignifiante pour Ogdy

On peut même dire que l'hypothèse de la comète *active* présente une faiblesse terrible qui pratiquement la condamne à n'être qu'une hypothèse d'école (mais rien n'est moins sûr, on a vu en 1994 avec l'impact, tout à fait inattendu, de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter que toutes les surprises restent possibles). Car on sait que l'espérance de vie active des comètes à courte période est extrêmement courte à l'échelle astronomique (23), variable selon le diamètre sublimable de la comète, sa période de révolution et sa distance périhélique (c'est la formule de Öpik (24)). Les calculs montrent, sans ambiguïté, que les comètes actives à courte période ayant un diamètre sublimable de l'ordre de 1 km ont une espérance de vie inférieure dans tous les cas à 3000 ans. Pour une comète de 100 mètres seulement, cette espérance de vie est inférieure à 300 ans, 500 au grand maximum. La probabilité d'une collision entre la Terre et une comète active de 100 ou 200 mètres de diamètre, durant cette courte période, est donc pratiquement nulle. Il faudrait que cette collision ait lieu lors de l'une des 50 premières révolutions de la comète autour du Soleil, après sa capture dans le Système solaire intérieur. Cela sent trop le "coup de pouce du destin", inadmissible pour un scientifique sérieux.

J'ai dit plus haut, dans le chapitre consacré aux comètes, que les fortes approches à la Terre des comètes actives sont très rares : environ une demi-douzaine par siècle à moins de 0,100 UA, ce qui est vraiment très peu (25). Pour les comètes de moins de 100 mètres, on peut tabler sur seulement une approche par siècle en moyenne. Autant dire que pour ce qui est de l'impact d'une comète *active* de 100 mètres de diamètre moyen avec la Terre, les chances sont quasiment nulles. On voit que l'hypothèse de la comète active est pratiquement réduite à néant avec ce problème de l'espérance de vie des comètes.

Il n'en reste pas moins vrai que l'hypothèse de l'EGA cométaire, ou pour parler autrement du noyau cométaire, est là pour prendre la relève. Elle a longtemps été retenue par la majorité des astronomes, car elle semblait nettement la plus probable, malgré quelques insuffisances gênantes.

On sait que certaines comètes (certaines et pas toutes) possèdent un noyau solide qui survit sous forme d'astéroïde (d'origine) cométaire, une fois que tous les éléments volatils qui distinguent une comète se sont sublimés dans l'espace (26). La vie passive (ou inactive) des comètes à courte période est

environ 1000 fois plus longue que leur vie active et dure quelques millions ou dizaines de millions d'années. Ce laps de temps leur laisse, évidemment, tout loisir de venir frôler une ou plusieurs des quatre planètes intérieures, avant d'entrer en collision avec l'une d'elles, ou d'être éjectées du Système solaire à la suite de perturbations catastrophiques.

Une densité au moins égale à 2,0 g/cm³

De nombreux spécialistes croient que le noyau cométaire de la Toungouska était probablement une chondrite carbonée géante, de densité voisine de 3,0 g/cm³ et d'un diamètre de 70 mètres environ, si l'on admet la masse de 500 000 tonnes tenue pour la plus probable. Pour une densité un peu plus faible, c'est-à-dire 2,0 g/cm³, le diamètre pouvait avoisiner les 80 mètres.

La majorité des divers effets constatés pendant et après l'explosion dans l'hypothèse cométaire restent valables dans celle du noyau. Mais celui des phénomènes lumineux devient moins évident, encore que les nuits claires sont explicables par la diffusion dans l'atmosphère des milliards de particules microscopiques produites lors de l'explosion. Rappelons-nous les éruptions volcaniques de grande envergure et le "pseudo-miracle de Josué" qui ont été associés à une luminosité inaccoutumée de l'atmosphère.

Cette hypothèse de l'impact d'un noyau cométaire, qui semblait s'imposer définitivement dans le courant des années 1970, et qui reste d'ailleurs tout à fait envisageable, a cependant été progressivement contestée pour des raisons que je vais expliquer maintenant.

L'hypothèse de l'astéroïde

Etonnamment, cette hypothèse qui avait prévalu en 1908, sous l'appellation de *météorite géante de la Toungouska*, qui a plus ou moins survécu par la suite, est revenue progressivement sur le devant de la scène, soutenue par des spécialistes comme Zdenek Sekanina et Ramachandran Ganapathy. Elle est aujourd'hui de loin la plus probable (27/28), même si elle a le défaut d'expliquer plus difficilement certains effets constatés. La difficulté principale dans cette hypothèse est de démontrer que tous les effets enregistrés pendant et après l'explosion peuvent s'expliquer aussi bien que dans le cas de l'hypothèse cométaire.

Depuis le début des années 1960, une dizaine de stations scientifiques permanentes ou semi-permanentes, réparties dans quelques pays, et depuis les années 1970 l'armée américaine (longtemps sous le couvert "secret défense" pour des raisons de sécurité militaire), prennent systématiquement des photos des boules de feu et des gros météores qui entrent dans l'atmosphère. L'analyse des clichés obtenus dans ces stations a clairement montré que les collisions entre la Terre et des objets cosmiques allant de 100 à 100 000 tonnes étaient beaucoup plus fréquentes que ce qu'on imaginait auparavant. Mais seule une très faible proportion de ces bombes cosmiques parvient à survivre à la traversée de l'atmosphère terrestre, qui

s'est avérée être un écran protecteur très efficace, notamment les couches inférieures (troposphère et stratosphère).

L'étude soigneuse de milliers de clichés a permis de distinguer trois types différents de corps heurtant la Terre. D'abord, des objets durs, rocheux, que l'on a identifié avec les météorites pierreuses de nos collections (types H, L et LL) et qui sont des vestiges d'astéroïdes brisés lors de collisions dans l'espace. Il s'agit de la population dite *planétaire*. Ensuite, des objets plus fragiles, semblables aux météorites carbonées (type Cc) et que l'on pense être des vestiges cométaires. La "météorite" de la Toungouska serait l'un d'eux selon certains spécialistes. Enfin, un troisième groupe concerne deux types de matériaux très friables : une forme primitive de roches carbonées et des boules de poussières, essaims de particules soudées entre elles. Ces deux groupes concernent la population dite *cométaire*. Peu de météorites métalliques et de sidérolithes ont été observées par les stations de surveillance, et l'on pense maintenant que ces deux types de météorites représentent seulement 1 ou 2 % du matériel cosmique balayé journallement par la Terre.

Une désintégration tardive

Le problème de l'altitude des apparitions et des disparitions des différentes boules de feu enregistrées sur les clichés a été particulièrement étudié. Une surprise apparaît au moment des conclusions. C'est que même les grosses roches du groupe planétaire sont pulvérisées durant leur traversée de l'atmosphère et que seuls quelques débris, atteignant parfois une tonne, touchent le sol. C'est encore nettement plus évident pour le matériel des deux groupes cométaires qui, dans la plupart des cas, ne parvient pas jusqu'à la surface terrestre.

En octobre 1969, une boule de feu a survolé la ville d'Ojarks aux Etats-Unis. Elle s'est désintégrée à 22 km d'altitude en donnant lieu à deux fortes explosions, qui produisirent des ondes de choc comme en Sibérie. En décembre 1974, une boule de feu encore plus grosse, dont la masse a été estimée à 200 tonnes, a survolé la ville de Sumawa en Tchécoslovaquie. Elle s'est totalement désintégrée en trois secondes. Les principales émissions lumineuses eurent lieu entre 73 et 61 km d'altitude. Seul un petit fragment a atteint 55 km, et aucun débris n'a touché le sol.

Pour l'objet de la Toungouska, il est certain que l'explosion a eu lieu entre 5 et 10 km d'altitude, la plus probable étant 6 km. A cette altitude, la pression aérodynamique est environ trente fois supérieure à celle existant à une altitude de 22 km, à laquelle se désintégra la boule de feu d'Ojarks. On voit qu'il y a là un problème sérieux. Une explosion à 6 km d'altitude est une explosion *basse*, incompatible avec l'hypothèse d'un noyau de glace envisagé dans le cas d'une comète active. Cette explosion basse est même difficilement conciliable (mais sans doute pas impossible) avec l'hypothèse de l'astéroïde cométaire, avec un noyau solide à base de chondrite carbonée qui est un matériau fragile, mais qui parvient quand même parfois à toucher

le sol, puisqu'on en connaît plusieurs centaines de spécimens différents dans nos collections de météorites.

Le verdict de la résine : un astéroïde à enstatite

C'est ce problème de l'explosion bien tardive, d'autant plus que l'objet de la Tougouska a eu une longue trajectoire intra-atmosphérique, qui a obligé les spécialistes à réenvisager l'hypothèse, longtemps abandonnée, de la météorite véritable. Certains ont longtemps penché pour un matériel planétaire, composé de roches relativement dures (densité de l'ordre de 3,5 g/cm³), comparables à celles des chondrites des types LL ou L de nos collections de météorites. Le bombardement se serait uniquement produit sous une forme microscopique et ses vestiges seraient les milliards de globules minuscules qui existent, sous forme de "mitraille" enfouie dans la zone sinistrée de la Sibérie centrale.

Un progrès très significatif a pu être obtenu au début des années 1990. Une équipe Italienne, menée par Giuseppe Longo et Menotti Galli (1922-2011) (29/30), a eu l'excellente idée d'étudier des gouttes de résine datant de 1908 et préservées dans le tronc même de certains conifères meurtris de la zone d'impact. Cette résine s'est révélée extraordinairement riche, puisqu'elle contient en grande quantité des micro-particules, en particulier du fer, du calcium, de l'aluminium, de la silice, de l'or, du cuivre, du titane, mais aussi plusieurs autres éléments. Les spécialistes italiens ont conclu à *l'explosion d'un astéroïde à enstatite de type E*, c'est-à-dire un corps équivalent à nos chondrites à enstatite dont on connaît deux variétés (EL et EH).

Comment interpréter ce résultat étonnant et très important ?

Ogdy : un fragment planétaire d'un objet mixte

Ogdy, dont le diamètre était de 60 ou 80 mètres, était obligatoirement un fragment d'un astéroïde cométaire, c'est-à-dire un objet qui a eu dans le passé une activité cométaire. Mais si cette activité était définitivement stoppée, peut-être à cause de l'existence d'une croûte trop épaisse pour permettre aux derniers éléments volatils de se sublimer, la désintégration a libéré la totalité du matériel du corps cosmique et permis les effets cométaires indiscutables dont j'ai parlé.

On sait aujourd'hui que les innombrables fragments générés par Hephaistos et ses divers groupes, nés d'un émiettement inéluctable et quasi permanent depuis quelques milliers d'années, sont de nature soit cométaire, soit planétaire. Certains morceaux existant encore doivent être mixtes, avec des traces de glace originelle remontant à la formation même du corps parent.

Nous avons expliqué que le fameux *Complexe des Taurides*, identifié par Fred Whipple (1906-2004) dans les années 1950, mais sans qu'il fasse le rapprochement avec Ogdy, contient d'innombrables morceaux de taille décamétrique, de nombreux autres de taille hectométrique et quelques-uns

de taille kilométrique et que tous ne sont pas homogènes, loin de là. L'hétérogénéité pourrait être la règle, si l'on en croit la grande variété des micro-particules repérées dans la fameuse résine des chercheurs italiens et celles ramassées sur le site lui-même, et qui ont étonné par leur richesse qui a fait croire à certains que leur origine était artificielle (voir plus loin).

Personnellement, je crois, comme tous les astronomes de l'école britannique des néo-catastrophistes, à l'hypothèse formulée d'abord par Kresak, d'une parenté entre P/Encke et Ogdy, mais pour celui-ci une composition ou planétaire ou mixte. Cette hypothèse devrait se préciser ces prochaines années. Mais d'ici là un léger doute subsiste.

Une source inépuisable d'hypothèses et d'élucubrations

La Tougouska : un OVNI qui a explosé

Ce doute, à coup sûr, arrangera tous ceux qui aiment le mystérieux et le fantastique, et surtout ceux qui en vivent. Le mystère "fait vendre", il faut s'y faire. Mais le mystère s'est éclairci quand même très sérieusement, et les nouveaux auteurs auront du mal à être crédibles s'ils s'éloignent des trois hypothèses classiques.

J'ai expliqué que l'absence de cratère météoritique et de débris apparents constatés lors de la première expédition scientifique de 1927 avait débridé les imaginations. A ce jour, on ne compte pas loin d'une centaine d'hypothèses publiées, certaines n'étant rien d'autre que des élucubrations dénuées de tout fondement scientifique (31). Pour conclure ce chapitre, je rappelle pour mémoire les trois hypothèses les plus connues et qui ont toutes obtenu lors de leur parution un petit succès d'estime. Il faut cependant ajouter, d'ores et déjà, que la très grande majorité des scientifiques sérieux ne les considère plus que comme des curiosités.

Il faut d'abord parler de l'hypothèse de l'astronef extraterrestre, émise en 1946 par l'ingénieur soviétique Alexandre Kazantzev (1906-2002) (32), et reprise depuis par de nombreux auteurs, scientifiques ou non. Pour certains, l'astronef entier aurait explosé dans le ciel sibérien, mais pour d'autres, il pourrait seulement s'agir d'un dispositif nucléaire de l'engin largué sur Terre pour une raison inconnue. Kazantzev avait été frappé par la similarité des dégâts constatés en Sibérie et à la suite des explosions de Hiroshima et de Nagasaki en 1945. Il est facile de comprendre pourquoi Kazantzev a fait de nombreux émules depuis, le côté fascinant de son hypothèse est plus passionnant que la stricte hypothèse astronomique.

Il est inutile de cacher que depuis 1946, cette possibilité de l'explosion d'un vaisseau extraterrestre a toujours excité la curiosité des amateurs d'insolite. Cette hypothèse s'est donc souvent trouvée répercutée par des organes de presse un peu trop complaisants, pratiquement chaque fois qu'un nouveau

chercheur connu l'a reprise à son compte, bien souvent pour se faire un peu de publicité facile. Ainsi dans son numéro du 30 octobre 1978, *le Parisien Libéré* s'est fait l'écho de l'hypothèse de l'astronome russe Felix Zigel (1920-1988) sous le titre suivant : " *Selon un savant soviétique, un OVNI s'est écrasé sur la taïga en 1908* (33) ". Dans cet article, repris d'autres articles parus en URSS, Zigel conclut que l'engin était une sonde interplanétaire d'origine artificielle et que la puissance de l'explosion était de 40 mégatonnes, équivalente à 2200 bombes atomiques de type Hiroshima (ici les chiffres les plus probables sont multipliés par 4). Il reprend à son compte les sornettes selon lesquelles le corps céleste aurait changé deux fois de trajectoire en pénétrant dans les couches denses de l'atmosphère : venant du sud, il aurait d'abord obliqué vers l'est, pour finir ensuite vers l'ouest. D'après Zigel, seul, évidemment, un engin artificiel aurait pu effectuer de telles manœuvres. Il parle aussi de la radioactivité accrue, des preuves de mutations chez certaines espèces d'insectes et de plantes et de leur teneur anormalement élevée en zinc, brome, sodium et fer. Il conclut que tous ces éléments ne sont pas typiques des noyaux cométaires, mais sont très valables pour des constructions artificielles.

De l'antimatière au trou noir

Cet exemple montre bien que la passion reste vive quand on aborde le sujet de la Toungouska. Il n'est donc pas étonnant que chaque hypothèse vraiment nouvelle, émise par des chercheurs reconnus, bénéficie d'une large publicité. Ce fut le cas pour les deux hypothèses suivantes qui méritent qu'on les rappelle rapidement en passant. Elles ont l'avantage sur beaucoup d'autres d'être crédibles, même si leur probabilité reste extrêmement faible (pour ne pas dire quasi nulle).

En 1965, trois scientifiques américains : Clyde Cowan (1919-1974), Chandra Atluri et Willard Libby (1908-1980) (34) proposèrent leur hypothèse de la rencontre de la Terre avec un fragment d'antimatière, qui se serait annihilé lui-même dans l'atmosphère. L'énergie libérée dans ce genre de collision matière-antimatière est si importante que le fragment d'antimatière n'aurait pas excédé 16 grammes (contre 500 000 tonnes dans l'hypothèse météoritique).

Enfin, il faut citer l'hypothèse du micro-trou noir, avancée en 1973 par deux autres physiciens américains, Albert Jackson et Michael Ryan (35). Le micro-trou noir aurait eu la masse d'un gros astéroïde (10^{14} à 10^{16} tonnes) et un rayon géométrique négligeable (moins d'un milliardième de millimètre). Il aurait traversé la Terre de part en part, à environ 100 000 km à l'heure, et serait ressorti dans l'Atlantique nord avant de continuer sa course dans l'espace.

Inutile de dire que les trois hypothèses ci-dessus, ainsi que les nombreuses autres dont je n'ai pas parlé, mais que Vladimir Rubtsov, l'historien de la Toungouska, détaille dans son livre *The Tunguska mystery* (36), souffrent de la comparaison avec celles étudiées précédemment, notamment celle de

l'astéroïde qui est presque satisfaisante. Toutes ces hypothèses marginales présentent des insuffisances notoires, et leur probabilité est pratiquement nulle, même si quelques points de détail posent réellement des problèmes non encore résolus un siècle après le cataclysme.

L'imagination étant l'un des propres de l'homme en général, et du scientifique en particulier, de nouvelles idées apparaîtront encore dans l'avenir pour tenter d'expliquer cette catastrophe cosmique, la plus importante du XX^e siècle. Mais ce n'est pas s'avancer beaucoup de dire qu'elles resteront, à coup sûr, des hypothèses marginales.

La région de la Toungouska, site protégé pour l'avenir

Le retard pris pour aller étudier la région de l'impact (il a fallu attendre 19 ans pour que Kulik puisse atteindre la région dévastée) a été une faute impardonnable sur le plan scientifique, une faute totalement inimaginable de nos jours, et, il faut bien le dire, incompréhensible. Aujourd'hui c'est une lutte sans merci, quasiment une course de vitesse, entre les scientifiques qui veulent percer les secrets encore décelables et la nature qui, comme toujours sur la Terre, reprend progressivement ses droits et efface inexorablement les traces du passé.

Les autorités russes, bien conscientes de l'intérêt tout à fait considérable de la région sur le plan scientifique, ont ouvert le droit aux savants étrangers de venir, eux aussi, sur le site, privilège réservé aux chercheurs soviétiques jusqu'au début des années 1980 (37). On sait que cette non-étude par les savants des autres pays a débouché sur des querelles concernant certains résultats qui ont été ouvertement critiqués, notamment ceux concernant les mutations, données comme certaines par les uns et niées par les autres.

On peut être certain que l'internationalisation de la recherche sur le site de la Toungouska va déboucher sur des résultats importants. De nouvelles simulations dues à l'astronome russe Vladimir Svetsov (38) laissent à penser que des petits fragments de l'objet de la Toungouska ont pu se séparer du corps principal à une altitude de 20 à 15 km et ainsi éviter la désintégration générale qui l'a totalement détruit entre 5 et 10 km. Certains de ces petits fragments ont pu survivre et toucher le sol. Reste à les trouver. Les calculs de Svetsov montrent qu'il faudrait chercher nettement au sud-est de l'épicentre, entre 5 et 10 km.

Quelle satisfaction si de nouvelles recherches intensives sur le terrain permettaient de retrouver ne serait-ce que quelques-uns de ces fragments ayant survécu à la désintégration. Malgré les difficultés, les chercheurs restent optimistes. Avoir dans les mains un échantillon du centaure Hephaistos qui a fait tant de misères à nos ancêtres est probablement une réalité de demain.

Notes

1. Cette date du 30 juin 1908 est celle du calendrier international (*grégorien*), quasiment utilisé dans le monde entier à l'époque, *sauf* en Russie et dans d'autres pays soumis à la religion orthodoxe (Grèce, Bulgarie, Yougoslavie). En Russie, on utilisait encore à l'époque tsariste le calendrier *julien* (établi sous Jules César) qui comportait un décalage de *13 jours* en moins. Pour les Russes de l'époque présoviétique, la catastrophe sibérienne est donc datée du 17 juin 1908 (date notée dans les pays étrangers 17/30 juin, 17 vieux style, 30 nouveau style ou grégorien). Ce n'est que le 1/14 février 1918 que l'URSS adopta le calendrier grégorien. La Grèce s'y soumit en 1923 seulement. On se doute que c'est le poids du clergé qui permit aux pays de religion orthodoxe de rester si longtemps à l'écart d'une (r)évolution calendaire tout à fait indispensable.
2. J'ai choisi d'utiliser le terme français de *Toungouska* plutôt que le terme international de *Tunguska*. Alain Carion, dans son livre *Les météorites et leurs impacts*, et d'autres auteurs ont fait un choix identique, mais le terme *Tunguska* reste très utilisé, même en France.
3. Z. Sekanina, *The Tunguska event : no cometary signature in evidence*, *Astronomical Journal*, 88, pp. 1382-1414, 1983. Article de référence écrit par un expert des comètes qui réétudie toutes les données astronomiques et physiques sur le météore de la Toungouska et qui conclut à une origine *astéroïdale* pour cet objet.
4. R.A. Gallant, *Journey to Tunguska*, *Sky and Telescope*, 87, pp. 38-43, juin 1994.
5. C. Sagan, *Cosmos* (Mazarine, 1981). Titre original : *Cosmos* (1980). Dans ce livre de vulgarisation, associé à une série d'émissions télévisées, Carl Sagan a consacré le chapitre IV, intitulé *Le paradis et l'enfer* (pp. 73-99) aux cataclysmes d'origine cosmique. Il parle du cataclysme de la Toungouska et publie de nombreux récits obtenus, lors de la première expédition de 1927, de témoins oculaires proches et souvent victimes eux-mêmes du drame.
6. E.L. Krinov, *Giant meteorites* (Pergamon Press, 1966). Le premier livre de référence pour les impacts de la Toungouska en 1908 et celle de Sikhote-Alin en 1947.
7. Quelques personnes ont atteint la région de la Toungouska avant 1927, mais on ne peut pas parler d'expédition *scientifique*. Dès 1910, à l'époque tsariste, un certain négociant russe nommé Susdalev, sans doute appâté par un profit possible (on était persuadé qu'il était tombé une grosse météorite à l'époque), se rendit sur place, mais hormis l'ampleur impressionnante des dégâts, il ne trouva rien de monnayable et en tout cas aucun fragment de météorite.

8. E.L. Krinov, *The Tunguska and Sikhote-Alin meteorites* dans B.M. Middlehurst and G.P. Kuiper (eds), *The Moon, Meteorites and Comets* (University of Chicago Press, 1963). Dans le chapitre 8 de ce gros livre collectif (pp. 208-234), Krinov raconte d'une manière détaillée les premières expéditions sur le site.

9. Ne pas confondre *Francis Whipple* (1876-1943), astronome britannique qui le premier, en 1930, proposa une origine cométaire pour l'événement de la Toungouska et *Fred Whipple* (1906-2004), astronome américain spécialiste de l'étude des comètes. Leurs initiales identiques ont parfois prêté à confusion.

10. C. Trayner, *The Tunguska event*, *Journal of the British Astronomical Association*, 107, 3, pp. 117-130, 1997. Intéressant article de synthèse qui comporte une bibliographie d'une centaine de titres.

11. L. Kresák, *The Tunguska object : a fragment of Comet Encke ?*, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 29, 3, pp. 129-134, 1978.

12. A. Ben-Menahem, *Source parameters of the siberian explosion of june 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations*, *Phys. Earth Planet. Int.*, 11, pp. 1-35, 1975.

13. Ogdy était obligatoirement un EGA de type Apollo *qui s'éloignait du Soleil* et qui donc avait été dans les jours précédant l'impact noyé dans le rayonnement solaire. La géométrie de son approche à la Terre était telle qu'il était totalement indécélable.

14. V.G. Fesenkov, *A study of the Tunguska meteorite fall*, *Soviet Astronomy*, 10, pp. 195-213, 1966. Vassili Fesenkov (1889-1972) a été l'un des pionniers de l'astrophysique en URSS et un expert en météorites et en cosmologie.

15. K. Hindley, *Tunguska, la boule de feu du siècle*, *La Recherche*, 112, pp. 717-718, 1980. Dans cet article, Keith Hindley signale qu'en 1834, à l'occasion d'un drainage, on a trouvé des traces comparables à celles de la Toungouska dans l'île d'Axholme dans le Lincolnshire (Angleterre). Le cataclysme pourrait remonter à quelques millénaires. Est-il possible qu'il soit associé au cataclysme du XIII^e siècle avant J.-C., ce qui paraît assez vraisemblable compte tenu de sa localisation géographique, ou à l'impact d'un autre fragment de *Hephaistos* ?

16. Tous les spécialistes du sujet, pourvus d'ordinateurs de plus en plus performants, travaillent sur différents modèles de collision, en faisant varier évidemment tous les paramètres. Cela donne des résultats satisfaisants pour l'esprit mais qui restent *théoriques*. Les résultats obtenus n'ont souvent rien à voir avec ce qui s'est passé ponctuellement pour une collision donnée.

17. Le *nombre de Mach* qui est utilisé pour les vitesses supersoniques n'est pas une unité de vitesse. C'est le rapport, variable selon le milieu et la

température, entre la vitesse du mobile et celle du son. La *vitesse du son*, dans l'air à 0°C, est de 331 m/s (1192 km/h). Dans une atmosphère surchauffée, comme dans le cas d'un impact, cette vitesse augmente (par exemple, dans de l'air à 500°C, elle est de 557 m/s, soit 2005 km/h). Dans l'eau à 8°, la vitesse du son est beaucoup plus élevée : 1435 m/s (5166 km/h). On voit qu'une vitesse moyenne d'impact, qui est de 20 km/s, n'a rien de comparable avec la vitesse du son : elle est près de 60 fois supérieure.

18. B.Y. Levin and V.A. Bronshten, *The Tunguska event and the meteors with terminal flares*, *Meteoritics*, 21, pp. 199-215, 1986.

19. J.C. Brown and D. W. Hughes, *Tunguska's comet and non-thermal ¹⁴C production in the atmosphere*, *Nature*, 268, pp. 512-514, 1977.

20. M.-A. Combes et J. Meeus, *Les fortes approches des comètes à la Terre*, *L'Astronomie*, 110, pp. 254-261, 1996.

21. En 1982, dans la version originale de *La Terre bombardée*, j'écrivais un peu trop légèrement : " *Mais là encore, ces deux coïncidences sont tout à fait insuffisantes pour prouver une origine commune* ". On sait aujourd'hui que P/Encke est le résidu (pas forcément le résidu principal, même s'il semble être *le dernier encore actif*, donc le seul d'apparence cométaire) d'une grosse comète qui venait il y a quelques dizaines de milliers d'années à proximité de la Terre. De nombreux petits corps *d'apparence astéroïdale* circulent sur des orbites similaires (voir le chapitre sur les comètes pour plus de détails).

22. P.A. LaViolette, *The cometary breakup hypothesis re-examined*, *Monthly notices of the Royal astronomical society*, 224, pp. 945-951, 1987.

23. M.-A. Combes, *Note sur les EGA planétaires et cométaires*, *L'Astronomie*, 94, pp. 131-137, 1980.

24. E.J. Öpik, *Interplanetary encounters*, 1976.

25. Les spécialistes des comètes ont recensé moins d'une demi-douzaine de fortes approches (inférieures à 0,100 UA) de *comètes actives* à la Terre pour le XX^e siècle. Même si certaines comètes faibles ont pu être ratées par les astronomes, il est *exclu* que les fortes approches aient dépassé la dizaine, ce qui est très peu.

26. Z. Sekanina, *A core-model for cometary nuclei and asteroids of possible cometary origin*, pp. 423-428, in T. Gehrels (ed.), *Physical studies of minor planets* (NASA, SP-267, 1971).

27. J.G. Hills and M.P. Goda, *The fragmentation of small asteroids in the atmosphere*, *Astronomical Journal*, 105, pp. 1114-1144, 1993.

28. G.V. Andreev, *Was 1908 Tunguska's event begot by Apollo-type object ?*, in C. Lagerkvist and H. Rickman (eds), *Asteroids, Comets, Meteors III*, 1987.
29. G. Longo et al., *Search for microremnants of the Tunguska cosmic body*, *Planetary and Space Science*, 42, pp. 163-177, 1994.
30. *Tunguska's smoking gun ?*, *Sky and Telescope*, p. 14, december 1994.
31. On a recensé une cinquantaine d'hypothèses pour expliquer le cataclysme de la Toungouska. Seules une demi-douzaine sont possibles, trois seulement sont *crédibles*.
32. L'ingénieur russe Alexandre Kazantzev a proposé le premier l'hypothèse de l'impact accidentel d'un vaisseau spatial dès 1946, mais il n'y a pas l'ombre d'une preuve. Cette hypothèse n'est qu'un fantasme, mais il ne faut pas oublier que Kazantzev était aussi un auteur de science-fiction.
33. *Le Parisien Libéré*, *Selon un savant soviétique, un OVNI s'est écrasé sur la taïga en 1908*, numéro du 30 octobre 1978.
34. C. Cowan, C. Atluri and W. Libby, *Possible anti-matter content of the Tunguska meteor of 1908*, *Nature*, 206, pp. 861-865, 1965.
35. A.A. Jackson and M.P. Ryan, *Was the Tunguska event due to a black hole ?*, *Nature*, 245, pp. 88-89, 1973.
36. V. Rubtsov, *The Tunguska mystery*, Springer, 2009. Dans ce livre remarquable, écrit par l'historien scientifique russe Vladimir Rubtsov, qui est l'un des historiens de la Toungouska, il est longuement question de tous ces chercheurs soviétiques qui ont travaillé sur le site mais qui ont publié leurs résultats uniquement dans des revues russes. Il confirme que les chercheurs soviétiques ont obtenu des preuves concernant les mutations post-cataclysme, ce qui est un résultat assez inquiétant.
37. Ce sont les savants russes eux-mêmes qui demandent que la région de la Toungouska soit classée site protégé par l'UNESCO. Ce serait le seul moyen de retrouver encore des traces du cataclysme de 1908 qui s'effacent inexorablement.
38. Vladimir Svetsov, comme beaucoup de ses confrères, a effectué plusieurs simulations concernant l'entrée dans l'atmosphère du météore de la Toungouska. Il en a déduit que la fragmentation a débuté dans la haute atmosphère, et donc que les petits débris séparés rapidement du fragment majeur ont pu éviter la désintégration totale. D'après lui, la découverte de petits fragments rescapés est très possible, probable même si l'on cherche au bon endroit.

CHAPITRE 10

LES MÉTÉORITES ET LES MÉTÉORES

Un phénomène connu depuis l'Antiquité

Le phénomène de la chute de pierres (aérolithes) et de morceaux de fer (sidérites) sur la Terre était connu des hommes depuis la plus haute Antiquité (1), bien qu'il ait fallu attendre le début du XIX^e siècle pour qu'il soit admis, à contre cœur les premiers temps, par la communauté scientifique. Jusqu'à cette période, celle-ci s'était montrée résolument rétrograde et aveugle devant l'évidence la plus flagrante. En effet, les historiens chinois, grecs et romains, et plus tard ceux du Moyen Age, ont transmis de très nombreuses relations de ces chutes d'objets célestes indiscutables.

Il faut savoir que le fer météoritique a été employé par les hommes dès les premiers âges de la civilisation (2). Ce n'est pas sans raison que l'ancien mot par lequel on désignait ce métal, *sideros*, signifie *astre* aussi bien que *fer*. L'ancien nom égyptien du fer, *baanepe*, veut dire "métal du ciel".

Chez les Sumériens, le fer s'appelait *an-bar*, ce qui signifie "feu du ciel" et chez les Hittites, *ku-an*, mot qui a la même signification. Le mot hébreu pour fer, *parZil*, et l'équivalent en assyrien, *barZillu*, sont dérivés de *barZu-ili* qui signifie "métal de Dieu" ou "métal du ciel" comme en Égypte. Encore aujourd'hui, le mot géorgien de météorite est le mot *tsis-natckhi* qui veut dire "fragment du ciel".

Beaucoup plus récemment, le fer météoritique a encore été utilisé par les hommes, comme le montrent les deux exemples suivants (3). Le *Rocher du Pôle* ou *Rocher du Nord*, en mongol *Khadasoutsilao*, était une sidérite d'une quinzaine de mètres de haut, tombée non loin de la source du Fleuve Jaune en Chine. Elle se trouvait isolée au milieu d'une plaine et recouverte partiellement d'oxyde de fer. La tradition mongole racontait que ce rocher était une "étoile" tombée sur la Terre à la suite d'un "grand feu du ciel". Il semble, malheureusement, que cette météorite ait disparu depuis un siècle. Elle a dû être utilisée par les gens de la région pour un usage inconnu, mais probablement domestique.

La pièce principale de la chute de Campo del Cielo, en Argentine, chute qui remonte à environ 6000 ans, était une grosse sidérite connue son le nom de *Meson de Fierro*, la Table de fer. Elle a dû être également utilisée par la population locale, puisque à chaque expédition successive (1576, 1774, 1776, 1779 et 1783) son poids semble avoir été en régression. Estimé à 23 tonnes au XVI^e siècle, il fut ramené ensuite à 18 puis à 14 tonnes. Cette

météorite bien connue jadis n'existe plus aujourd'hui, tout au moins sous sa forme initiale.

Ce fut probablement le destin d'une grande part des sidérites de bonne taille que d'être utilisées comme matière première, utile et bon marché, pour la confection d'armes, d'outils et produits domestiques divers, par les populations ayant bénéficié (ou subi) de chutes de fer céleste sur leur territoire.

Météorites sacrées

A l'opposé de cet usage "utilitaire", certaines pierres météoritiques anciennes furent élevées à la dignité de divinités (4). Cela est dû au fait que le phénomène de la chute de pierres célestes était regardé, par des populations encore bien frustes, comme une manifestation directe des puissances surnaturelles.

Ainsi, d'authentiques pierres du ciel furent adorées sous les noms de *Cybèle* ou *Mère des Dieux* chez les Phrygiens, de *Jupiter Ammon* chez les Libyens, météorite qui fut transportée à Rome en 104 avant J.-C. où elle devint l'objet d'un culte particulier. La plus connue de ces pierres sacrées s'appelle *Elagabale*, du nom de l'empereur romain Elagabal (Marcus Aurelius Antoninus, 204-222, mort assassiné à 18 ans seulement par les prétoriens qui ne pouvaient plus le supporter !) qui la fit amener en grande pompe à Rome sur un char tiré par quatre chevaux et qui prétendit en faire la divinité suprême de tout l'Empire romain (5). Cette célèbre pierre noire, ramenée des confins du désert de Syrie, avait environ 90 cm de hauteur et 85 cm de diamètre à la base. Une pièce de monnaie de l'époque rappelle cette extravagante histoire.

Beaucoup plus récemment, certaines météorites étaient encore adorées par des peuplades primitives. Il suffit de se rappeler l'histoire d'une pierre du ciel qui tomba le 6 mars 1853, près de Duruma au Kenya, sur le territoire d'une tribu de noirs Wanikos. Pendant trois ans, cette pierre "divine" d'environ 600 grammes fut adorée par les membres de la tribu. Ils refusèrent des offres d'achat fort alléchantes de missionnaires européens, car ils étaient persuadés que leur divinité céleste allait les protéger contre leurs ennemis. Mais en 1856, une tribu voisine de l'ethnie rivale des Masaï extermina une bonne partie de la population soi-disant "protégée". Les survivants cessèrent immédiatement de croire en la puissance protectrice de leur divinité et ils vendirent dès qu'ils le purent la météorite, redevenue pour eux un simple caillou monnayable.

Enfin, et surtout, il faut parler de l'une de ces pierres sacrées qui a traversé les millénaires et qui est encore adorée de nos jours : la célèbre *Pierre noire* qui est scellée dans l'angle sud-est de la *Kaaba*, le fameux édifice cubique qui se trouve au centre de la principale mosquée de la Mecque. Cette pierre fut longtemps considérée comme "le centre du monde" avec au-dessus d'elle (à sa verticale) "la porte du ciel", lieu de communication entre la Terre et le

Ciel, c'est-à-dire le point d'accès au Paradis céleste. Les Musulmans l'appelaient aussi "la main droite de Dieu sur la Terre", croyant être en présence de l'une des pierres précieuses du Paradis, d'où elle serait tombée en Arabie avec Adam (6). Cela dit, les Musulmans d'aujourd'hui refusent que la *Pierre noire* soit étudiée par des scientifiques, même par l'un des leurs, et un petit doute subsiste sur sa nature et sa composition exacte. Mais pour des minéralogistes du XIX^e siècle qui, eux, l'ont eu en main, il n'y a pas de problème, et ils ont attesté à l'époque de la nature météoritique de la pierre sacrée.

1492 : la météorite d'Ensisheim, un "miracle" bien réel

En 1492, l'année même où Christophe Colomb découvrait l'Amérique, tomba en Alsace, à Ensisheim, après une série de détonations entendues de fort loin, la plus ancienne météorite conservée en Europe, d'un poids d'environ 127 kg. Plusieurs documents de l'époque relatent cette chute absolument incontestable. Voici le texte de l'un d'eux (7) :

" En l'an de grâce 1492, le mercredi d'avant la Saint-Martin, le septième jour de novembre, se produisit un étrange miracle. Ce jour-là donc, entre la onzième et la douzième heure de midi survint un grand coup de tonnerre et un vacarme qu'on entendit loin à la ronde, puis une pierre de deux cent soixante livres tomba des airs sur le ban d'Ensisheim. Et le bruit fut beaucoup plus fort ailleurs qu'ici. Un jeune garçon la vit s'abattre dans un champ de blé vers le bois situé vers le Rhin et l'Ill, près de Gissgang, et ceci sans faire de mal à l'enfant. Quand le Conseil l'apprit, il se rendit sur place et beaucoup de morceaux en furent détachés, ce que les baillis interdirent ensuite. On fit amener la pierre dans l'église où l'on devait la regarder comme quelque chose de merveilleux, et beaucoup de gens vinrent de partout la voir, et on raconta aussi beaucoup de choses curieuses au sujet de cette pierre. Les savants eux-mêmes disaient qu'ils ne savaient pas ce dont il s'agissait et qu'une telle pierre tombant du ciel serait quelque chose de surnaturel. Il s'agirait plus sûrement d'un signe divin dont on n'a jamais vu auparavant, lu ou écrit quelque chose de ressemblant. Quand la pierre fut trouvée, elle gisait à un mètre de profondeur dans le sol, comme si Dieu avait voulu qu'on la trouve. Et si le bruit s'est entendu jusqu'à Lucerne et Villingen, il fut si fort dans certains villages, que les gens crurent que des maisons s'étaient écroulées... "

Cela montre bien que la chute de pierres célestes était une chose avérée depuis toujours, même si on la prenait encore souvent pour un signe de Dieu, ou même pour un authentique "miracle", mot utilisé souvent à propos de la météorite d'Ensisheim. De nombreux dessins significatifs ont été publiés à ce sujet tout au long du Moyen Age.

A cette époque pourtant, quelques savants éclairés, qui surtout ne voulaient pas nier l'évidence, admettaient facilement l'origine atmosphérique de ces pierres tombées du ciel, acceptant en cela l'explication assez tarabiscotée donnée par Aristote (384-322), au IV^e siècle avant J.-C., dans son *Traité du Ciel* et dans ses *Météorologiques*.

XVIII^e siècle : la destruction des collections

Au XVII^e siècle, René Descartes (1596-1650), dans son *Discours sur les météores* (1637), croyait encore en l'existence de ces "pierres de tonnerre" ou "pierres de foudre", comme on les appelait alors communément, et qui bien entendu continuaient de tomber plus ou moins régulièrement sur le sol terrestre. Des collections de pierres tombées du ciel existaient, on le sait, améliorées et complétées de génération en génération par des savants désireux de préserver l'avenir, même si parfois la nature exacte de ces pierres restait indéterminée pour beaucoup d'entre elles.

J'ai parlé au chapitre 3 de la suite de cette histoire et la difficile reconnaissance des météorites par la communauté scientifique de la fin du XVIII^e siècle. Aujourd'hui, tout cela c'est de l'histoire ancienne, et personne ne conteste l'origine cosmique de ces "pierres tombées du ciel". Une mauvaise période oubliée, mais sur laquelle il faut dire encore quelques mots pour ceux qui s'étonnent qu'on ne possède pas de météorites anciennes dans nos musées.

L'épisode que j'ai passé sous silence est l'incroyable destruction au XVIII^e siècle des collections de météorites amassées au fil des siècles, une véritable catastrophe qui résulte du zèle plus qu'intempestif des savants des *Lumières*. Avoir jeté comme "pierres sans aucune valeur" des trésors du genre Allende ou Murchison est un crime contre la science, et tout cela pour cause de "modernisme" autoproclamé. Les *Lumières* et les météorites, cela n'a pas été le grand amour, c'est le moins qu'on puisse dire. Mais le mal est fait, irréversible, démentiel quand on y réfléchit. Quelle erreur que d'avoir dilapidé ces collections avec tant de légèreté, c'est quasiment l'équivalent de la destruction des livres de l'Antiquité, pour cause de culture perverse !

Les plus grosses météorites terrestres : des sidérites

On connaît actuellement, avec certitude, cinq météorites de plus de 25 tonnes. Toutes sont des *sidérites*, ce qui est logique, car ces dernières sont beaucoup plus résistantes que les *aérolithes* et aussi, il faut le dire, beaucoup plus faciles à repérer une fois au sol. Il a pu exister dans le passé des sidérites plus volumineuses que celles actuellement recensées, mais comme je l'ai signalé, elles n'existent plus (tout au moins dans leur forme initiale), car elles ont servi de matière première facilement utilisable aux populations locales.

La plus grosse météorite terrestre connue de nos jours d'une façon certaine est la sidérite de Hoba qui pèse environ 60 tonnes. Elle fut découverte en 1920, près d'une ferme située à 20 km de la ville de Grootfontein en Namibie (ex-Sud-Ouest africain). Mais il est bien évident que la chute est beaucoup plus ancienne et remonte probablement à plusieurs siècles. Aucune légende locale ne semble attachée à cet objet qui a dû pourtant, vu sa masse, provoquer un spectaculaire "feu du ciel" avant de toucher le sol.

La seconde météorite en importance est la sidérite de Cape York (Groenland), rebaptisée depuis Ahnighito, connue depuis 1818 et qui pèse 34 tonnes. Lors de son séjour au Groenland en 1818, le navigateur John Ross (1777-1856) reçut des Esquimaux de la baie du Prince Régent, où il avait accosté, des couteaux à lames de fer et à poignées en os. Ces lames s'avérèrent avoir été taillées dans un bloc de fer météoritique. En 1894, un autre navigateur, Robert Peary (1856-1920), se fit montrer par les autochtones les blocs météoritiques d'où avaient été extraites les fameuses lames en question. Il s'agissait alors de trois blocs, dont deux importants d'un poids de 34 et 3 tonnes, et d'un autre plus petit pesant environ 400 kg (un quatrième a été découvert depuis (8)). Peary fit transporter les deux petits fragments à New York en 1895, et le gros en 1897. Là encore, on ne sait rien de la date de cette chute multiple, les Esquimaux ne pouvant donner aucun renseignement à ce sujet.

La troisième météorite par ordre de poids décroissant, toujours une sidérite, est celle de Chingo. Elle a été découverte dans le désert de Gobi à une date inconnue, et pèse environ 30 tonnes. Elle a été transportée à Urumchi, ville du nord-ouest de la Chine. La chute pourrait dater du XIX^e siècle, car des récits circulent à ce sujet parmi la population locale. La forme de cette météorite, grossièrement conique avec deux renflements caractéristiques, lui a valu le surnom de *chameau d'argent*.

On connaît encore deux météorites répertoriées de plus de 25 tonnes. Il s'agit de la sidérite de Bacubirito, au Mexique, connue depuis 1863 et qui pèse 27 tonnes et celle de Mbosi, en Tanzanie, connue depuis 1930 et qui pèse 25 tonnes. Pour ces deux chutes, on ignore également tout des dates réelles des impacts qui doivent remonter à quelques siècles.

Plusieurs autres sidérites de plus de 10 tonnes sont connues, mais aucune d'entre elles n'a été observée lors de sa chute.

1947 : la "pluie de fer" de Sikhote-Alin

La chute météoritique de Sikhote-Alin, en 1947 (9/10), fut très remarquable et mérite qu'on s'y arrête un instant. Elle se produisit, à 10h38 heure locale, dans une région boisée de la Sibérie orientale. Plusieurs milliers de témoins ont pu apprécier les différentes phases du phénomène.

La météorite, dont la masse préatmosphérique a été évaluée à un millier de tonnes et le diamètre à 6 ou 7 mètres seulement (l'équivalent des NEA

minuscules de magnitude 28 ou 29 que l'on découvre aujourd'hui), se déplaçait du nord au sud. Pendant quatre à cinq secondes, elle fut plus éblouissante que le Soleil qui luisait déjà haut, dans un ciel hivernal pratiquement sans nuages. Les arbres et tous les objets opaques avaient une deuxième ombre qui se déplaçait très rapidement en même temps que la météorite. Celle-ci laissait derrière elle une épaisse traînée sombre qui resta visible plusieurs heures. De violents coups de tonnerre furent entendus à plus de 200 km du point d'impact.

Les calculs des astronomes montrèrent que la météorite de Sikhote-Alin, qui était une sidérite, a parcouru environ 140 km à l'intérieur de l'atmosphère terrestre, avec une vitesse de l'ordre de 15 km/s. Ce long séjour dans l'atmosphère entraîna une formidable augmentation de la température de l'objet céleste qui atteignit 5000 degrés. A environ une dizaine de km du sol, la météorite (qui était un objet unique à l'origine, tous les témoins sont formels) se fractura en plusieurs milliers de morceaux de toutes tailles. Cet émiettement entraîna une diminution très importante de la vitesse des divers fragments qui tombèrent sur le sol sous l'influence de leur propre poids. La "pluie de fer" fut un spectacle fantastique pour les rares témoins du dernier acte. Les débris parsemèrent une surface de 50 km² environ. Plus de 20 tonnes de fer et de nickel furent récupérées, avec un fragment majeur de 1,7 tonne. De plus, 122 petits cratères de 0,5 à 26 mètres furent creusés dans une zone elliptique de 2 x 1 km. On trouva de nombreux arbres déchiquetés ou même fendus par des éclats dans le centre de la zone d'impact.

Il est intéressant de savoir que l'orbite préatmosphérique de cette sidérite exceptionnelle a pu être reconstituée avec une bonne approximation. L'objet était un minuscule astéroïde de type Apollo 3 (membre de l'anneau principal des astéroïdes), avec $a = 2,16$ UA, $e = 0,54$, $q = 0,99$ UA et $i = 9^\circ$. A noter donc que le périhélie était juste à l'intérieur de l'orbite terrestre.

Cette chute de Sikhote-Alin a été particulièrement bien étudiée et a permis aux astronomes de progresser dans leur connaissance des météorites (qui ne sont rien d'autres que des astéroïdes minuscules avant de heurter la Terre). Elle a surtout permis de constater que même les corps *denses* comme les sidérites (densité entre 7,5 et 8,0) ne sont pas à l'abri de la fragmentation en traversant l'atmosphère. Celle-ci forme un écran protecteur relativement efficace pour les petits objets, notamment quand la trajectoire à l'intérieur de la zone dense de l'enveloppe atmosphérique dépasse les 100 km. Autre constatation très importante faite à la suite de cette chute : le total des fragments récupérés à la suite de plusieurs campagnes soignées sur le terrain ne représente que le 1/50 environ de la masse préatmosphérique. La très grande partie de l'objet initial s'est donc littéralement volatilisée et n'a même pas touché le sol.

1969 : Allende et Murchison, des trésors tombés du ciel

L'année 1969 restera comme une année exceptionnelle dans l'histoire des météorites, une année unique même. Deux des plus extraordinaires connues à ce jour l'ont été cette année-là : *Allende* et *Murchison* (11/12). Je vais rappeler brièvement ce qui fait l'intérêt de ces deux météorites.

Allende : la pierre de Rosette du ciel

J'ai déjà dit quelques mots de cette céléberrissime météorite carbonée au chapitre 5, dans la section consacrée à la naissance du Système solaire, car elle contient des traces indéniables de l'explosion de la supernova qui précéda de peu la formation du Soleil et des planètes. Il s'agit donc d'un objet cosmique d'un intérêt exceptionnel dont il est utile de connaître la carrière terrestre.

La météorite d'Allende est tombée le 8 février 1969 près du village mexicain de Pueblito de Allende dans l'État de Chihuahua, dans le nord du pays. Elle se fragmenta dans l'atmosphère, mais à assez basse altitude, ce qui permit de ramasser plusieurs centaines de fragments éparpillés sur une surface de près de 150 km². On récupéra une masse totale supérieure à deux tonnes, avec un fragment majeur de 110 kg, ce qui en fait le trésor le plus inestimable jamais récupéré par les météoriciens.

Tout de suite, la météorite d'Allende s'avéra unique et contraignit les cosmologistes à revoir leurs modèles. Elle était de type CV3, mais surtout certaines de ses inclusions renfermaient plusieurs éléments chimiques présentant des *anomalies isotopiques* inexplicables par les processus normaux agissant depuis l'origine du Système solaire. Ces éléments anormaux, *enrichis*, s'avérèrent avoir été créés par nucléosynthèse dans le cœur d'une étoile massive qui explosa par la suite et dont la matière fut injectée dans la nébuleuse présolaire, très peu de temps avant la formation du Système solaire. Ainsi la météorite d'Allende contient la plus vieille matière actuellement connue, une matière plus ancienne que la Terre elle-même, issue d'une génération antérieure d'étoile.

Quel cadeau du ciel pour toute la communauté scientifique que cette grosse météorite tombée un jour de février 1969 sur le territoire d'un petit village du Mexique ! Un vestige qui nous rappelle que la Terre (et les Terriens que nous sommes) sont des poussières d'étoiles, issus de cataclysmes cosmiques gigantesques ayant eu lieu il y a plusieurs milliards d'années. Des cataclysmes que les chercheurs actuels, munis d'instruments de mesure hyper sophistiqués, sont capables de dater avec précision grâce à l'étude d'échantillons minuscules. On se rend bien compte avec cet exemple du bond phénoménal fait par la science au XX^e siècle.

Murchison : des acides aminés par dizaines

C'est le matin du 28 septembre 1969, sept mois et demi seulement après la chute d'Allende, qu'une autre météorite carbonée, de type CM2, tomba à Murchison en Australie. Plusieurs fragments furent ramassés en quelques jours, avec beaucoup de soin, ce qui permit d'empêcher toute contamination terrestre, fléau n° 1 pour ce genre de météorites qui peuvent être rapidement "polluées" par de la matière organique terrestre.

L'analyse isotopique permit, comme pour la météorite d'Allende, de mettre en évidence de nombreuses anomalies dans les inclusions réfractaires. Les spécialistes annoncèrent que la matière de cette météorite était originaire de deux types de supernovae de composition différente, donc une matière très ancienne, *présolaire*, qui s'était condensée lors de l'effondrement de la nébuleuse de laquelle sont issus le Soleil et son cortège planétaire.

En outre, une analyse chimique qui se poursuivit plus d'un quart de siècle permit la découverte de plus de 70 acides aminés différents, dont beaucoup n'existent pas sur la Terre. Même s'ils ne sont pas d'origine biologique, il est clair que ces acides aminés d'origine cosmique laissent entrevoir une vie extérieure à notre Système solaire, et donc la possibilité d'une vie terrestre venue d'ailleurs, comme nous le verrons au chapitre 14.

1972 : le météore du Montana, le record d'approche à la Terre

Le 10 août 1972, il s'est passé un événement exceptionnel (unique à ce jour) dans le ciel de l'Amérique du Nord : un astéroïde d'une quinzaine de mètres de diamètre (un NEA minuscule comme on en connaît plusieurs dizaines en 2011) et d'une masse de 4000 à 5000 tonnes, connu sous l'appellation de *météore du Montana*, a traversé l'atmosphère terrestre sans se rompre et est reparti dans l'espace interplanétaire (13/14).

Un météore magnifique fut aperçu en début d'après-midi (à 14h30, heure locale), dans le ciel de l'Utah. Il fut suivi pendant 101 secondes exactement, par plusieurs dizaines de milliers de témoins, sur une distance de 1500 km sur une trajectoire sud-nord qui lui fit traverser l'Utah, le Montana et une partie de l'Alberta au Canada, avant de quitter notre atmosphère. Son éclat atteignit 100 fois l'éclat de la pleine Lune (soit une magnitude d'environ -18 ou -19). Sa vitesse était proche de 15 km/s par rapport à la Terre et il laissa derrière lui une épaisse traînée. Celle-ci fut visible plus d'une heure, après avoir plusieurs fois changé de forme.

L'intérêt, c'est que ce petit astéroïde s'approcha jusqu'à 58 km au-dessus du sol du Montana. Si son altitude avait été de 10 km inférieure, il aurait frappé la Terre, probablement sur le territoire de l'Alberta. L'énergie d'un tel impact aurait été de l'ordre de 5×10^{14} joules, ce qui est loin d'être négligeable à l'échelle locale. C'est l'équivalent d'un séisme de 6,7 ou de plusieurs bombes

du type Hiroshima. Cependant, comme pour la chute de Sikhote-Alin, il est possible (sinon probable) qu'il y aurait eu fracturation de l'objet dans les couches basses de l'atmosphère, et donc des dégâts moindres, sinon inexistants.

Le nombre important d'observations, de films et de photographies pris dans d'excellentes conditions, a permis de calculer une orbite assez précise pour cet objet céleste. Il s'agissait d'un minuscule astéroïde de type Apollo 2 (circulant en moyenne entre l'orbite de Mars et le bord interne de l'anneau principal des astéroïdes), avec $a = 1,66$ UA, $e = 0,39$, $q = 1,01$ UA, $Q = 2,3$ UA et $i = 15^\circ$. A la date de la rencontre, le 10 août 1972, la Terre se trouvait à une distance de 1,014 UA du Soleil et avait une vitesse héliocentrique de 29,4 km/s. L'astéroïde venait juste de franchir le plan orbital de la Terre, du nord au sud, et voyageait à 34,8 km/s. Il rattrapa la Terre par derrière, à la vitesse initiale de 10,1 km/s, vitesse qui augmenta ensuite jusqu'à 15 km/s, du fait de la force d'attraction de la Terre qui accéléra sensiblement son mouvement.

Cet événement original est un cas particulier, probablement assez rare, en matière de rencontre entre la Terre et un corps cosmique. Comme il ne s'en produira sans doute pas un autre du même type avant fort longtemps (peut-être plusieurs centaines d'années), il n'en est que plus utile et intéressant et il a passionné les spécialistes. Cela a prouvé, s'il en était encore besoin, que des objets cosmiques de ce diamètre (entre 5 et 20 mètres) sont légion et que de telles rencontres sont fréquentes, même à l'échelle humaine.

1976 : la chute de pierres de Jiling en Chine

Si les principales sidérites connues n'ont pu être observées lors de leur chute, hormis celle de Sikhote-Alin (mais dont le fragment principal n'est que de 1,7 tonne), il n'en est pas de même pour la plus grosse des aérolithes recensées, celle de Jiling, en Chine (15) (connue aussi sous l'appellation de Kirin), qui a eu lieu en 1976 et qui a eu pour témoins plusieurs dizaines de milliers de Chinois.

Le 8 mars 1976, vers 15 heures heure locale, un magnifique météore rouge allant du nord-est au sud-ouest fut observé par de très nombreux habitants du district de Jiling (ville de 600 000 personnes à l'époque) en Mandchourie, dans le nord-est de la Chine. Durant la traversée de l'atmosphère, il y eut plusieurs explosions et dans les derniers instants avant l'impact, *trois* météores distincts furent observés. Grâce à une très importante mobilisation populaire, organisée par le gouvernement chinois et orchestrée par plusieurs équipes de professeurs, de très nombreux fragments furent récupérés dans une zone elliptique orientée est-ouest, sur une distance de 1° en longitude, ce qui est assez énorme et ne s'était jamais vu auparavant. Le principal morceau avait un poids de 1,77 tonne, il fut retrouvé à quelques dizaines de mètres seulement d'un groupe de maisons, après avoir creusé un cratère de 2 mètres de diamètre et de 3 mètres de profondeur. Mais en fait, c'est plus de 4 tonnes de matériel qui furent récupérées. Tous les fragments avaient

une croûte noirâtre fondue par l'échauffement causé par le frottement atmosphérique. Les analyses ont montré qu'il s'agissait d'une chondrite à olivine et bronzite (les plus riches en ferro-nickel), donc de type H.

Cette chute de Jiling est donc celle qui fut la mieux observée et dont on possède la meilleure documentation de toute l'histoire des chutes de météorites. Elle a permis de connaître la plus grosse aérolithe recensée à ce jour. L'ancien record appartenait à l'aérolithe de Norton, dans le Kansas (États-Unis) qui pèse 1,08 tonne, et dont la chute fut observée le 18 février 1948.

Les météorites de l'Antarctique

L'Antarctique est un vaste continent de glace de 14 millions de kilomètres carrés, longtemps inviolé et donc "neuf", et qui s'est révélé être tout à fait privilégié pour trouver des météorites. D'ailleurs la "récolte" a déjà dépassé les prévisions les plus optimistes. De plus, leur conservation s'est trouvée être maximale. Autant de raisons qui font de l'Antarctique un véritable Eldorado pour les météoriciens, d'autant plus qu'ils ne sont pas soumis dans cette partie du monde inaccessible, à la concurrence des "contrebandiers", terme employé un peu méchamment pour désigner les personnes qui ne font pas partie des sphères officielles. Les missions se succèdent pratiquement sans discontinuer durant la saison favorable, toujours avec le même succès, et on a déjà trouvé des spécimens de très grande valeur, parmi lesquels des météorites d'origine martienne et lunaire.

C'est un géologue japonais qui recueillit fortuitement les neuf premières météorites antarctiques en janvier 1969, alors qu'il participait à une campagne de sondages sismiques. En 1974, une première expédition japonaise ramassa plus de 600 météorites en un seul mois, réussite exceptionnelle qui démontra le remarquable potentiel du réservoir antarctique. A partir de 1976, grâce aux Américains, et notamment à William Cassidy (16) qui comprit très tôt tout l'intérêt de ces trouvailles, les recherches devinrent régulières et systématiques.

Chaque pièce nouvelle se voit attribuer un numéro d'immatriculation (par exemple ALHA 77 005 et EETA 79 001), composé de lettres identifiant le lieu de la trouvaille (par exemple Y pour Yamoto mountains et ALHA pour Allan hills) et de cinq chiffres, les deux premiers pour l'année et les trois autres pour le numéro d'ordre dans l'année. Plus de trente sites différents sont recensés et il y en aura beaucoup d'autres dans l'avenir.

Les météorites tombent normalement sur la glace, puis s'y enfoncent progressivement avant d'être entraînées avec elle par son écoulement superficiel. La structure du sous-sol et les barrières naturelles que forment les collines ou les montagnes, ainsi que le vent souvent violent qui balaie la surface du sol, permettent parfois aux météorites de "refaire surface" dans des zones privilégiées, zones qui peuvent être assez éloignées parfois du point de chute initial. Ce mécanisme naturel assez simple s'est avéré très

efficace et permet en outre de prévoir où l'on a de bonnes chances de trouver des météorites sur la glace.

Le nombre déjà important d'échantillons recueillis (plusieurs milliers), a permis de faire des premières études statistiques très intéressantes. On sait que 93 % des météorites antarctiques sont des aérolithes, 6 % des sidérites et 1 % des sidérolithes. En fonction de la masse des objets récoltés, on obtient environ 85 % d'aérolithes, 11 % de métalliques et 4 % de sidérolithes. Par rapport aux météorites traditionnelles, on a pu en conclure que les sidérites se conservent mieux et surtout se repèrent plus facilement.

L'Antarctique est une vraie chance pour les météoriciens, ils disposent là d'un réservoir quasiment inviolé sur un territoire qui demandera des décennies à être seulement défriché. Parmi les dizaines de milliers de météorites qui les attendent, on peut espérer découvrir de nouveaux spécimens uniques et à coup sûr de nouvelles météorites d'origine martienne qui s'avèrent particulièrement intéressantes, comme nous le verrons au chapitre 14.

Composition et classification des météorites

On sait que les météorites se partagent en deux grandes catégories : les *chondrites* et les *météorites différenciées* (17). Les premières sont des pierres primitives, rescapées de l'origine du Système solaire, qui ont conservé leurs caractéristiques originelles. Les secondes, beaucoup plus récentes, ont été fondues dans leur corps d'origine, ce qui signifie qu'elles sont des menus fragments d'objets primaires qui ont dépassé 300 km, diamètre nécessaire pour générer une différenciation sous l'effet de la gravité. Elles ont donc subi une modification de structure et de composition chimique.

Classiquement, on divise aussi les météorites en trois grandes classes selon leur composition :

1. les *sidérites* qui contiennent principalement du fer et du nickel, à la densité élevée (7,0-7,8).
2. les *aérolithes* (les météorites pierreuses), à la densité beaucoup plus faible (2,5-3,5), composées principalement de silicates.
3. les *sidérolithes*, contenant en quantités équivalentes des silicates et du fer-nickel, de densité intermédiaire (5,0-6,0).

Il faut noter l'adjonction d'un chiffre (de 1 à 7) après la lettre ou les lettres qui indiquent le type chimique. Ce chiffre correspond au *type pétrologique*. Ainsi Allende est classée CV3, Murchison CM2, Pultusk H5 et Holbrook L6.

Pour ce qui est des corps parents, parmi les achondrites, les *euclites* sont des vestiges de l'astéroïde Vesta, comme je l'ai expliqué au chapitre 6, et les sidérites sont des noyaux de gros astéroïdes différenciés et brisés

ultérieurement. On connaît depuis longtemps de tels astéroïdes de fer (de type M), comme 1986 DA qui pourrait heurter la Terre dans l'avenir. Les chondrites ordinaires (LL, L et H) sont très courantes, mais ont peu de corps parents recensés dans l'espace. Cela s'explique sans doute par l'existence d'une croûte de poussières silicatées à la surface des astéroïdes S. Mais sous cette croûte de surface protectrice, de nombreux NEA de type S doivent être des chondrites de type LL, L ou H qui subiront encore des fragmentations avant de venir heurter notre planète.

Les SNC (sigle pour le groupe des Shergottites, Nakhrites et Chassignites), elles, sont suspectées d'être d'origine martienne, et présentent donc un intérêt tout particulier. Ces météorites auraient été éjectées de la planète rouge à la suite d'impacts rasants. Elles sont beaucoup plus jeunes que les météorites carbonées.

La météorite de Farmington et l'hypothèse Hephaistos

Cette météorite de Farmington, qui pourrait n'être qu'une météorite parmi des milliers d'autres, est en fait d'un intérêt exceptionnel. Elle est tombée le 25 juin 1890, vers 13 heures, près de la ville de Farmington dans le Kansas, aux Etats-Unis, à la position 39°45'N et 97°2'O. Cette chute faisait suite à l'apparition d'un météore très brillant et à des détonations, comme c'est souvent le cas. On connaît deux fragments issus de cette chute, l'un de 85 kg et l'autre de 4 kg. Les premières études, tout de suite après la chute, montrèrent qu'il s'agissait à l'origine d'une pierre unique, brisée tardivement durant la traversée de l'atmosphère, et qui fut classée plus tard comme une chondrite noire à olivine et hypersthène, fortement bréchée. Il s'agit donc d'une chondrite ordinaire, de type L, à faible teneur en métal libre et de densité de l'ordre de 3,7.

Les diverses concentrations pour les éléments analysés dans la météorite de Farmington sont les suivantes (en parts par million) : K = 850, Ba = 9,1, Zn = 102, Sc = 6,0, Ti = 574, Ge = 9,5, V = 72,6, Se = 8,1, Te = 0,150, Cr = 2720, Mn = 2760, F = 250, Cl = 170 et Co = 532. Je rappelle que les chondrites à olivine et hypersthène sont les plus courantes dans les collections de météorites, puisqu'elles dépassent, à elles seules, le tiers des spécimens connus (35 % environ).

Beaucoup plus tard, il s'est avéré que cette météorite de Farmington était en fait la plus jeune météorite connue, et de loin, dans la mesure où son âge d'objet indépendant est de 25 000 ans seulement. Cet âge d'exposition dans l'espace, extraordinairement court à l'échelle astronomique, indique la date de la dernière fragmentation dont cet objet a été victime. Les astronomes catastrophistes de l'école britannique, David Asher, Victor Clube, Bill Napier et Duncan Steel (18), à la recherche de tous les phénomènes célestes en rapport avec le *Complexe des Taurides*, ont pu montrer que cette météorite faisait partie de ce *Complexe*, lié à P/Encke et à certains autres astéroïdes de

la famille Hephaistos. Le radiant et la date de la chute, le 25 juin, semblent indiquer une identité probable, sinon incontestable.

Ainsi, on posséderait déjà un fragment du fameux centaure disloqué et dont certains fragments sont entrés en collision avec la Terre durant la protohistoire et l'Antiquité. La composition de ce fragment, composé principalement d'olivine et d'hypersthène, dans une matrice chondritique, indique une composition *planétaire* et non cométaire. Avec les traces retrouvées dans la résine des arbres de la Toungouska, ce serait le deuxième indice sérieux d'une origine au moins partiellement *planétaire* pour les débris connus des résidus de Hephaistos. Rien d'étonnant à cela, dans la mesure où j'ai expliqué qu'il s'agissait d'un objet mixte, à la fois planétaire et cométaire. Et bien sûr, ce sont les fragments planétaires qui ont la meilleure chance de toucher le sol, et donc d'être récupérés sous forme de météorites, et non seulement sous forme de "mitraille cométaire", de taille tout au plus millimétrique, comme le sont, au contraire, les débris d'origine cométaire.

Les micrométéorites et la poussière cosmique

On sait depuis longtemps que la Terre recueille chaque jour des milliards de grains de matière extraterrestre, principalement sous forme de poussières. J'ai dit plus haut que des estimations modernes donnent le chiffre approximatif de 100 tonnes par 24 heures, soit 4 tonnes par heure et 1 gros kilogramme par seconde, ce qui paraît d'ailleurs assez peu. Une partie substantielle (90 %) de ces grains ont une taille comprise entre 0,05 et 0,5 millimètre. Il s'agit donc bien de poussière cosmique.

Les scientifiques ont évidemment cherché un moyen de récupérer cette matière extraterrestre pour l'étudier avec le matériel ultramoderne dont ils disposent. Il s'est avéré qu'il existait une excellente solution pour récupérer ces microparticules, même si elle n'est pas très commode à mettre en pratique : l'extraire des déserts de glace où elles sont piégées à l'abri de toute pollution. C'est ainsi que le météoricien français Michel Maurette a eu l'idée d'expéditions spécialisées au Groenland et en Antarctique (19). A partir de 1984, et avec des instruments de plus en plus sophistiqués, il a recueilli plusieurs milliers d'échantillons.

Comme prévu, il s'est avéré que cette matière était principalement de nature carbonée, puisque produit de décomposition des comètes, mais une partie semble concerner de la poussière interstellaire capturée par le Système solaire à l'occasion de la traversée de nuages galactiques. Cette matière micrométéoritique est d'une composition équivalente à la matière des chondrites carbonées, avec notamment une forte teneur en minéraux hydratés, en hydrocarbures, en acides aminés (c'est-à-dire une matière composant la matière biologique) et en hydrocarbures aromatiques polycycliques (les fameux HAP). On sait que l'ensemble de ces éléments organiques a été regroupé sous le nom générique de CHON (pour Carbone, Hydrogène, Oxygène et N pour azote).

L'intérêt principal des micrométéorites est qu'elles ne sont pas désintégrées en entrant dans l'atmosphère. Leur échauffement par friction est insuffisant pour les détruire, comme c'est la règle pour les particules de taille millimétrique et supérieure, et ainsi les acides aminés qu'elles renferment, et qui ne se décomposent qu'à partir de 300 degrés, température qui n'est jamais atteinte, gardent leurs propriétés. Simplement, cette poussière cosmique met plus de temps pour se déposer tranquillement sur le sol et dans les déserts de glace où elle se fait piéger pour des dizaines, ou même des centaines ou milliers d'années parfois.

Cette poussière cosmique, que l'on commence seulement à étudier en grand détail, pourrait avoir eu une importance capitale pour l'apport de la vie sur Terre (20). La *panspermie microscopique* paraît être une possibilité très acceptable et ses supporteurs sont de plus en plus nombreux, comme nous le verrons au chapitre 14. Car il faut bien comprendre que ce flux actuel de 100 tonnes par jour de poussières cosmiques est totalement résiduel par rapport à celui qui existait lors de la formation et de la consolidation des planètes. Maurette a calculé qu'alors 500 000 micrométéorites *par mètre carré* percutaient la surface terrestre en dix ans. Malgré un environnement que l'on sait hostile, les micrométéorites sont tombées partout en masse et donc aussi dans les bons endroits protégés, capables de générer la soupe primitive, et aptes à développer la vie, en agissant comme des "réacteurs chimiques chondritiques", comme l'a expliqué le chimiste français André Brack.

Il semble bien que des tonnes de poussière cosmique soient récupérables ces prochaines années en Antarctique et au Groenland. Les équipes spécialisées pourront donc avoir accès à des échantillons qui ne sont pas obligatoirement tous équivalents. Que découvrira-t-on dans ces échantillons de poussières cosmiques ? Probablement des traces de vie indéniables, mais aussi peut-être des traces de panspermie microbienne annoncées par Fred Hoyle et Chandra Wickramasinghe, et dont je parlerai au chapitre 16. Ainsi les micrométéorites, l'un des composants mineurs et longtemps sous-estimé de la matière cosmique, pourraient en définitive nous apporter des précisions décisives sur notre passé.

Les pluies de météorites

La fragmentation des météorites durant leur traversée de l'atmosphère n'est pas un événement rare. On peut même dire qu'elle est la règle quand l'objet est assez volumineux, et surtout quand sa configuration structurale (et donc son homogénéité) est de mauvaise qualité. On pense généralement que pour les aérolithes cette fragmentation (qui peut être une désintégration dans le cas de noyaux cométaires et de météorites *carbonées*) a lieu entre 30 et 10 km d'altitude, zone dans laquelle la pression atmosphérique augmente très rapidement. Pour les sidérites, dont la résistance est nettement supérieure, la fracturation peut être plus tardive, c'est-à-dire survenir à un moment où l'altitude au-dessus du sol est inférieure à 10 km. Bien entendu,

la fragmentation peut avoir lieu seulement au moment de l'impact, notamment dans les cas où la trajectoire intra-atmosphérique est courte.

Quand la fragmentation a lieu dans l'atmosphère, on assiste à une *pluie* de météorites, spectacle inoubliable qui a marqué les témoins privilégiés de toutes les époques. Plusieurs pluies météoritiques ont été notées dans les chroniques de toutes les régions du monde. J'ai déjà parlé au chapitre 2 de la plus ancienne connue, celle qui date de l'époque de Josué (vers -1165) et qui a été notée dans la Bible.

Depuis le début du XIX^e siècle, nous sommes assez bien renseignés sur ces *pluies*, du moins pour celles qui ont eu des témoins oculaires, car il ne faut jamais perdre de vue que 71 % de la surface terrestre concerne des zones océaniques, et que parmi les 29 % restants, les zones désertiques, glaciaires et forestières sont nombreuses. On peut donc considérer que plus de 4 pluies sur 5 restent ignorées (cela est vrai également pour les chutes simples).

Il est intéressant de donner quelques renseignements (21) sur les principales de ces pluies météoritiques récentes (période de 200 ans). J'ai déjà évoqué la chute de L'Aigle en 1803, étudiée par Biot, qui ouvrit cette série, et qui fut, on l'a vu, décisive pour la reconnaissance des météorites en tant qu'objets d'origine cosmique.

La pluie suivante eut lieu le 22 mars 1808, à 6 heures du matin, à Stannern en Moravie (République Tchèque). On recensa de 200 à 300 fragments, mais seulement 66 furent récupérés, d'un poids total de 52 kg. Le fragment majeur pesait 6 kg environ.

Une autre chute notable, celle de Knyahinya en Ukraine, eut lieu le 9 juin 1866 vers 17 heures. Près de 1000 pierres tombèrent dans une petite aire de 3 x 1 km. Le poids total des fragments récupérés avoisinait les 500 kg, avec un fragment majeur de 293 kg qui fut un temps la plus grosse aérolithe connue dont la chute a été observée.

Le 30 janvier 1868 eut lieu l'une des plus importantes pluies de météorites connues à ce jour. Elle est répertoriée sous le nom de pluie de pierres de Pultusk, mais en fait elle se produisit sur une aire elliptique de 8 km de long et 1,5 km de large, entre Pultusk et Ostralenka, deux petites villes de Pologne. Il était environ 19 heures, lorsqu'un splendide météore fut observé par les témoins dans le ciel nocturne. Plusieurs détonations furent entendues, puis plusieurs milliers de fragments tombèrent du ciel provoquant un vrai feu d'artifice. On donne souvent le chiffre de 100 000 pierres différentes, mais cela est très exagéré. Les estimations plus raisonnables donnent entre 3000 et 20 000 fragments, avec un nombre de l'ordre de 10 000 comme étant le plus probable. Ce n'est déjà pas mal. La plus grosse pièce avait 9 kg seulement et plus de 200 fragments d'un poids supérieur à 1 kg furent récupérés. La plupart des morceaux ne dépassaient

pas quelques grammes. Plus de 200 kg de cette météorite figurent dans tous les grands musées spécialisés du monde.

La région de Mocs, près de Cluj en Transylvanie (Roumanie), fut également témoin d'une importante pluie, le 3 février 1882 vers 16 heures. Le nombre de fragments fut estimé à environ 3000. Le poids total récupéré atteignait près de 300 kg et le fragment majeur 56 kg.

Enfin, on peut citer l'une des plus remarquables pluies météoritiques du XX^e siècle qui eut lieu en Arizona, près de la ville de Holbrook, le 19 juillet 1912 vers 19h15. Là encore, un météore brillant et des détonations furent enregistrés, puis une pluie très importante car on a estimé le nombre de fragments à 14 000. Le poids total récupéré fut de l'ordre de 210 kg, avec un fragment majeur de 6 kg environ et une multitude de petits grains de quelques grammes seulement.

J'ai parlé plus haut des importantes pluies de Sikhote-Alin en 1947, de Jiling en 1976 et d'Allende en 1969. Mais le nombre de fragments individuels tombés du ciel (et non le nombre de fragments après impact qui est évidemment nettement supérieur) n'est pas connu avec précision. On peut dire simplement que ces trois chutes furent très importantes et dépassèrent le millier d'unités.

Quelques rappels sur les météores

La terminologie acceptée dans le monde entier est claire de nos jours. On appelle *météorites* les corps célestes solides qui atteignent la surface terrestre, quel que soit leur poids, et *météores*, les phénomènes lumineux produits par ces météorites durant leur passage dans l'atmosphère. On réserve le terme de *bolides* pour les météores dont l'éclat dépasse celui des grosses planètes (Jupiter, Mars et Vénus). L'appellation *étoile filante*, qui fait partie du langage populaire, est à proscrire et n'est pas utilisée par les scientifiques.

On connaît des *essaims* de météores qui sont désignés par le nom de la constellation où se trouve leur *radiant*, qui est le point d'émanation d'où semblent converger les trajectoires des différents météores issus d'une même région du ciel. Ces essaims de météores (environ 1200 différents sont catalogués (22/23)) ont une double origine. Certains ont une indéniable relation avec l'orbite de comètes connues ou inconnues et sont considérés comme des produits de la désintégration de ces comètes. D'autres essaims, moins nombreux, ont une relation avec le système des astéroïdes ou avec la matière interplanétaire répandue dans le plan de l'écliptique. Ce sont les produits de l'émiettement constant qui a cours dans le Système solaire (collisions et fragmentations). D'une façon très arbitraire, on parle en général d'*averses* de météores, par opposition à des *pluies* de météorites, parce qu'une averse est une pluie abondante et que, en principe, les averses *météoritiques* (qui ne touchent pas le sol) sont plus abondantes que les pluies *météoritiques* (qui arrivent à franchir le bouclier atmosphérique).

On connaît tous les essaims de météores principaux ainsi que les comètes et astéroïdes associés, c'est-à-dire les objets parents ou issus d'un progéniteur commun. Pas moins de cinq de ces essaims sont liés au centaure Hephaistos (voir plus loin).

Les astronomes estiment que la Terre balaie en 24 heures environ 100 tonnes de matière cosmique, parmi laquelle 90 tonnes environ (90 %) sous forme de poussière, et seulement une dizaine de tonnes (soit environ 10 %) de météorites proprement dites, c'est-à-dire des objets d'au moins quelques grammes. Certains jours, ces valeurs de base peuvent être augmentées très sérieusement et même quasiment décuplées, notamment quand la Terre traverse à certaines dates des essaims météoriques plus denses.

Durant ce balayage permanent, les corpuscules qui sont animés de grandes vitesses entrent en contact avec les couches supérieures de l'atmosphère et sont ralentis par le frottement. Comme tout mouvement freiné est automatiquement compensé par un échauffement, celui-ci entraîne "l'allumage" du météore. Mais cette apparition est toujours très courte, sauf exceptions. Elle ne dure qu'une fraction de seconde pour les plus faibles et peut atteindre quelques secondes (de 3 à 5 en général) pour les météores brillants. Pour les gros bolides, la durée d'apparition peut dépasser quelques dizaines de secondes (le météore du Montana du 10 août 1972 fut visible durant 101 secondes, record absolu). En moyenne, pour les météores brillants, l'altitude de "l'allumage" est de 140 km et celle de "l'extinction" est de 50 km, la trajectoire intra-atmosphérique pouvant dépasser 200 km.

Je rappelle enfin quelques chiffres. On a fixé à environ 30 millions le nombre de météores atteignant la magnitude 4 pour toute la Terre et par 24 heures. Pour la magnitude 0, qui est celle des étoiles brillantes comme Véga et Capella, le nombre des météores visibles par période de 24 heures est encore énorme : 400 000. Pour la magnitude -3, c'est-à-dire les bolides, près de 30 000 unités sont théoriquement observables. Mais il est important de rappeler que tous ces météores et bolides sont en fait des corpuscules tout à fait insignifiants qui ne dépassent pas (sauf exceptions) quelques milligrammes pour les plus faibles et quelques grammes pour les plus lumineux.

L'histoire des essaims de météores les plus remarquables

Un des essaims les mieux connus et des plus remarquables est celui des *Léonides*. Celles-ci sont observables chaque année du 13 au 15 novembre dans la constellation du Lion, comme leur nom l'indique, et ont une période de 33,3 ans. Elles sont très rapides car elles rencontrent la Terre de face (et donc les vitesses s'additionnent). Ces *Léonides* sont associées à la comète 55P/Tempel-Tuttle qui pourrait avoir été capturée par la planète Uranus, en l'an 126 de notre ère, à partir d'une orbite quasi parabolique, comme l'a montré Urbain Le Verrier (1811-1877) au XIX^e siècle. Il a été prouvé que les

brillantes averses de météores, décrites par les historiens en 902, 931, 934, 1002, 1101, 1202, 1366, 1533, 1602 et 1698 étaient liées aux *Léonides*. Une importante averse eut lieu en 1766 et elle frappa profondément les indigènes du Venezuela.

Une autre averse fut observée en Amérique du Nord en 1799, elle dura quatre heures et fut extraordinaire. Celle de 1833 fut encore plus fantastique : 240 000 météores furent dénombrés dans le ciel d'Amérique du Nord en quelques heures. En 1866, une chute importante, mais moins riche que les deux précédentes, fut enregistrée avec un taux horaire de 6000 météores. Les deux averses principales (ces averses principales ont lieu tous les 33 ans en relation avec la période de révolution de la comète) suivantes eurent lieu en 1900 et 1933, mais elles furent très faibles. Cela est dû au fait que des perturbations causées par Jupiter, Saturne et Uranus ont écarté la masse principale de l'essaim de plus de 3 millions de km de l'orbite terrestre. Dernier épisode en date, en 1966, du fait de perturbations récentes de sens contraire, la Terre se retrouva de nouveau dans un très dense noyau de *Léonides* le 17 novembre. L'averse fut courte mais très puissante, puisqu'en Amérique du Nord on dénombra plus de 2400 météores à la minute pendant le maximum d'intensité.

Un autre essaim célèbre est celui des *Perséides* dont les averses, plus ou moins intenses, se produisent chaque année du 10 au 12 août. Ce sont elles qui ont reçu le nom particulier de *larmes de Saint-Laurent*, du nom du saint que l'on fête le 10 août. Les *Perséides* sont liées à la comète 109P/Swift-Tuttle, dont elles sont le produit de la lente désintégration. Cette comète périodique a une longue période de 130 ans (découverte en 1862, elle a été réobservée en 1992) et elle essaime depuis longtemps tout au long de son orbite. L'activité des *Perséides* est connue depuis le Moyen Age et a été notée dans les chroniques à partir de l'an 865. Les principales averses eurent lieu en 1779, 1834, 1836 et 1839.

Il faut encore citer l'essaim des *Andromédides* ou *Biélides*, qui a un radiant large et irrégulier et dont les averses ont lieu du 17 au 27 novembre. Elles sont spécialement intéressantes, car elles sont le produit de la désintégration de la comète 3D/Biela. Après sa fracturation en décembre 1845 en deux composantes principales, sa fin fut très rapide et prit la forme d'une véritable désintégration non observée en direct malheureusement. La surprise pour les observateurs eut lieu le 27 novembre 1872, date à laquelle l'orbite de la comète coupait celle de la Terre. Dans la soirée, entre 19 heures et 1 heure du matin, soit pendant six heures, mais avec un maximum vers 21 heures, une fantastique averse de météores de toutes tailles fut observée en Europe. On a évalué le nombre total de *Biélides* à 160 000 cette nuit-là, où elles tombèrent sans interruption "à gros flocons", comme l'indiquèrent des milliers de témoins éberlués et incrédules, à partir d'un radiant proche de l'étoile Almak (gamma Andromède).

Treize ans plus tard, le 27 novembre 1885, on assista en Europe à une nouvelle averse exceptionnelle, juste à l'instant où la Terre croisait l'orbite de

la comète désintégrée. On compta encore près de 15 000 météores à l'heure. Par contre, depuis, on n'a rien observé du fait probablement de perturbations planétaires. En remontant dans le passé, on a noté que le radiant proche d'Almak avait déjà été observé en 1741, 1798, 1830, 1838 et 1847. Cela signifie qu'avant sa désintégration finale, D/Biela perdait déjà depuis un certain temps une partie non négligeable de sa matière qui s'était dispersée tout au long de l'orbite elliptique.

Parmi les autres essaims moins importants, il faut citer les *Draconides* ou *Giacobinides* du 9 octobre qui sont associées génétiquement à la comète 21P/Giacobini-Zinner. Elles ont fourni en 1933 une averse restée célèbre, puisqu'elle fut la plus importante depuis celle de 1885.

Les essaims de météores liés à Hephaistos

Parmi les essaims connus, cinq pourraient être de lointains résidus de la désintégration d'un progéniteur unique, l'ancien centaure Hephaistos, à travers quatre fragments encore existants. Je vais dire quelques mots de ces essaims.

– *Sagittarides*. Cet essaim est associé à Adonis et à son petit frère jumeau 1995 CS et est divisé en plusieurs essaims secondaires, probablement issus de la dernière séparation de quelques parties périphériques plus fragiles. Dans le cas de ces mini-fragments associés à Adonis, on doit plutôt parler d'un émiettement que de désintégration, émiettement qui se poursuit toujours.

– *Delta Cancridés*. Cet essaim, visible à la mi-janvier, est lié à l'astéroïde cométaire Hephaistos, l'un des deux fragments majeurs (avec Heracles) survivants de la fragmentation du centaure Hephaistos, auquel il donne logiquement son nom.

– *Bêta Taurides*. Cet essaim diurne, lié directement à 2P/Encke est l'un des composants du fameux *Complexe des Taurides*, mis en évidence par Fred Whipple au début des années 1950 et popularisé par les astronomes catastrophistes britanniques (24). Il est observable fin juin début juillet et on lui associe Ogdy, l'objet de la Toungouska.

– *S Taurides*. C'est le deuxième essaim du *Complexe des Taurides*, visible, lui, fin octobre et début novembre, et associé directement à P/Encke. Il est très diffus, preuve qu'il s'agit d'un essaim ancien et d'importance, vestige de la désintégration d'un gros objet, probablement de taille kilométrique, lié génétiquement à P/Encke, fragment qui a pu conserver une cohésion suffisante pour une survie provisoire.

– *S Khi Orionides*. Cet essaim, visible en décembre, est associé à l'astéroïde cométaire *Oljato*, le frère jumeau de P/Encke, qui a eu une activité cométaire jusqu'à très récemment, et qui a donc pu injecter sur son orbite une multitude de poussières dont la Terre récupère une partie.

Il est très probable que d'autres essaims mineurs et récents pourront être associés dans l'avenir à quelques comètes et même astéroïdes connus et à d'autres à découvrir. C'est la preuve que la désintégration d'un objet unique peut déboucher à moyen terme sur une multitude d'essaims météoriques, disséminés tout autour de la sphère céleste par le jeu d'une dispersion inéluctable.

Ce que nous apprennent les météorites et les météores

Les astronomes ont obtenu progressivement de nombreux renseignements valables des analyses des chutes de météorites et des observations de météores (25/26). Je vais dire quelques mots sur certains de ces résultats particulièrement significatifs.

Des orbites préatmosphériques comparables à celles des NEO

Les orbites préatmosphériques des météorites et des météores ont toujours intéressé les astronomes qui cherchent à les déterminer avec un maximum de précision. Il apparaît que toutes les orbites calculées sont tout à fait compatibles avec ce que l'on sait des orbites de NEO et celles des comètes. La majorité d'entre elles sont des orbites astéroïdales de sous-type 1, 2 ou 3, ce qui montre bien que les météorites et les météores sont des produits de désintégration d'objets plus gros (vrais astéroïdes et astéroïdes cométaires). De très nombreux météores ne sont pas membres de l'anneau principal des astéroïdes (objets de sous-type 3), mais ont des orbites nettement plus petites avec a compris entre 1,00 et 1,50 UA (sous-type 1) ou plus rarement avec a compris entre 1,55 et 2,00 UA (sous-type 2). Rien d'étonnant à cela, puisque des milliards de fragments minuscules *autonomes* circulent dans le Système solaire intérieur, et que plus les demi-grands axes sont faibles, plus les possibilités d'approches à la Terre sont grandes.

Il faut le rappeler, même si c'est aujourd'hui une évidence : météorites, météores, astéroïdes, comètes, tous font partie de la même grande famille, tous sont intimement liés (27).

La Terre grossit lentement

D'abord, il est certain que le poids de la Terre augmente régulièrement, même si ce phénomène n'est pas spectaculaire. On a calculé que 40 000 tonnes de particules cosmiques tombent sur la Terre chaque année. Le nombre de météorites touchant le sol avoisine les 200 000 par an, mais le poids de la météorite "moyenne" ne dépasse pas les 200 grammes. On admet actuellement qu'un corps de 100 tonnes entre chaque jour dans l'atmosphère terrestre, un corps de 1000 tonnes une fois par mois, un corps de 15 000 tonnes une fois par an, un corps de 100 000 tonnes tous les dix ans et un corps de 1 million de tonnes une ou deux fois par siècle.

Depuis 500 millions d'années, le poids de la Terre aurait augmenté de 0,001 %, c'est-à-dire de seulement 1/100 000, proportion négligeable par rapport à l'augmentation des 4 milliards d'années précédentes. Comme on sait que la masse de notre planète détermine en partie les différents processus géologiques et géophysiques qui ont lieu en permanence à l'intérieur de l'écorce terrestre, on en conclut cependant que l'apport de la matière cosmique, minime mais *ininterrompu*, fait de la Terre une planète qui poursuit sa formation et qui ne peut que "prospérer" au détriment de cette matière cosmique environnante inépuisable et sans cesse renouvelée, du fait que les comètes et les astéroïdes sont constamment menacés d'*émiettement*. Les astronomes ont calculé que si la matière météoritique qui tombe chaque jour sur la Terre ne se mélangeait pas aux roches terrestres existantes, elle formerait en un million d'années seulement une couche pouvant dépasser plusieurs centimètres.

La fragmentation est la règle

Les chutes de météorites ont également montré une chose importante : c'est que la fragmentation est la règle, même pour les objets denses (on l'a vu en 1947 avec la sidérite de Sikhote-Alin). Il semble très improbable, pour ne pas dire impossible, que les objets ayant une densité inférieure à 3,0, c'est-à-dire tous les *essaims*, les noyaux cométaires formés de glace, de gaz gelés et de matière météoritique plus ou moins agglomérée, les astéroïdes *carbonés* (de types C et D), puissent éviter la fracturation et la fragmentation en traversant l'atmosphère. Cela est plutôt rassurant car les pluies de pierres ou la volatilisation complète d'autres objets dans l'atmosphère ont des conséquences moins sérieuses que l'impact d'un objet unique ayant traversé cette atmosphère sans ralentissement significatif.

La fréquence des collisions d'astéroïdes sur la Terre, qui concerne des objets *entrant* dans l'atmosphère, est donc moins "mortelle" qu'il peut paraître à certains, surtout en ce qui concerne les petits objets. En règle générale, la fragmentation d'un objet unique produit un ou deux gros morceaux, quelques-uns de taille moyenne et de nombreux petits (on l'a souvent constaté lors de *pluies* météoritiques). Ainsi, un impact concernant un EGA de 300 mètres sur la Terre tous les 3500 ans, sur les parties *immergées* tous les 5000 ans et sur les parties *émergées* tous les 12 000 ans ne paraît pas une estimation excessive, au contraire elle paraît bien modeste. Je rappelle que parmi les NEA, il y a une bonne proportion (40 % selon les données actuelles) d'objets carbonés et de noyaux cométaires, qui ont une densité inférieure à 3,0 et qui n'ont donc pratiquement aucune chance d'arriver au sol sans fragmentation. On est donc en droit de se demander si les chiffres ci-dessus ne sont pas, en fait, nettement inférieurs à la réalité, et s'il ne faudra pas envisager une réévaluation.

Par contre, les chutes de météorites sous forme de *pluies* doivent être très fréquentes. Et c'est bien ce que l'on observe, puisqu'on en connaît de nombreux exemples récents. Dans le cas de pluies météoritiques, il est souvent impossible de savoir avec précision quelle était la masse totale de

l'objet original avant son entrée dans l'atmosphère. En effet, on s'est rendu compte qu'une part très importante (qui peut atteindre 95 % et même jusqu'à 99 % dans certains cas extrêmes) de la masse originale est totalement volatilisée et ne touche pas le sol. Cependant, on peut parfois en faire une estimation correcte d'après l'éclat du bolide, si l'on a pu calculer son orbite et donc sa distance réelle au moment de l'observation.

L'étude photographique et spectrographique des météores a clairement montré ce que l'on savait déjà : l'existence d'une double population de poussières cosmiques, l'une d'origine cométaire, l'autre d'origine astéroïdale. Je rappelle que toutes ces poussières et petits objets cosmiques, qui circulent en tant que particules ou essaims autonomes dans le Système solaire, sont le produit de la désintégration des noyaux de comètes et de l'émiettement permanent des astéroïdes. L'existence de cette double population se retrouve, bien sûr, à une échelle macroscopique, et l'on sait d'une manière certaine qu'il existe un *impactisme planétaire* et un *impactisme cométaire*, les deux entraînant des conséquences différentes.

Des traînées persistantes dans l'atmosphère

Il faut aussi insister un instant sur une constatation intéressante : l'existence de traînées persistantes à la suite de la traversée de l'atmosphère de météorites importantes et de météores très brillants. On l'a vu notamment en 1908, en 1947 et en 1972, où les objets concernés atteignaient ou dépassaient les 1000 tonnes, mais aussi lors de bien d'autres circonstances. Tous les observateurs ont constaté que ces traînées se déformaient au fil des minutes, du fait de perturbations atmosphériques, et qu'elles prenaient parfois des formes bizarres. Notamment, la forme du *serpent* a été notée à maintes reprises.

Rappelons-nous la légende de Typhon, dont j'ai parlé au chapitre 1, et de nombreuses observations consignées dans les chroniques du passé concernant la présence de "serpents" dans le ciel. Il a dû s'agir dans la majorité des cas de traînées persistantes, consécutives à des passages de gros météores à l'intérieur de l'atmosphère terrestre. Les serpents à têtes multiples (c'était notamment le cas de Typhon, le serpent "aux cent têtes") étaient tout simplement des traînées devenues multiples après une fragmentation dans l'atmosphère et une légère dispersion des objets secondaires ainsi produits.

L'impactisme microscopique, véhicule de la vie

On voit avec les quelques remarques ci-dessus tout l'intérêt de ces chutes de météorites et de l'observation des météores. Ils représentent les constituants microscopiques du bombardement terrestre, mais un matériel permanent, de tous les instants, puisqu'il ne se passe pas *une seconde* sans que la Terre ne capture au moins, au cours de son périple autour du Soleil, quelques centaines de grammes, et peut-être même bien davantage selon certaines estimations, de cette matière interplanétaire absolument inépuisable.

Je reparlerai des météorites au chapitre 14, qui concerne l'origine cosmique de la vie, car l'on sait aujourd'hui que certaines météorites carbonées contiennent des éléments prébiotiques, comme des acides aminés, et que d'autres qui sont originaires de la planète Mars pourraient receler des traces de vie fossile. Elles pourraient donc être les premières *preuves* directes que la vie existe, ou a existé, ailleurs que sur notre planète.

Il apparaît que l'impactisme microscopique pourrait avoir eu une influence essentielle dans le passé : il aurait apporté la vie. Alors que l'impactisme macroscopique apporterait la mort, à travers l'extinction de masse et l'impactisme particulière l'évolution (voir le chapitre 15), l'impactisme microscopique véhiculerait dans tout l'Univers un matériel prébiotique, capable en fonction des contingences locales, de générer la vie, une vie partout différente, toujours renouvelée, mais dont les éléments de base sont les mêmes.

L'étude des météorites montre bien que l'unicité de la vie terrestre ne tient pas. Les acides aminés existent partout, puisque certaines météorites carbonées recueillies en contiennent plusieurs qui n'ont pas réussi à s'imposer sur Terre. La vie terrestre est une vie locale, comme il en existe une, sinon partout dans l'univers, tout au moins dans beaucoup d'endroits.

La découverte récente de centaine d'exoplanètes, en attendant des milliers d'autres avant la fin du siècle, dont certaines ont des propriétés assez voisines de notre Terre, confirme que des systèmes planétaires avec une étoile et un cortège de planètes existent par millions dans notre Galaxie, sans parler des autres. Beaucoup de ces planètes ont été capables de créer et de garder la vie, même si cette vie ne ressemble pas forcément à la nôtre. En fait, l'univers est fait pour la vie. Le cosmos est vivant ! (28). C'est obligatoire. Croire l'inverse, c'est de l'anthropocentrisme moyenâgeux.

Notes

1. P.-M. Bigot de Morogues, *Mémoire historique et physique sur les chutes de pierres tombées à la surface de la Terre à diverses époques*, 1812. La lecture de ce remarquable document a dû être un véritable camouflet pour tous ceux qui ne voulaient pas croire à la chute de pierres sur la Terre.

2. L. LaPaz, *The effects of meteorites upon the Earth (including its inhabitants, atmosphere, and satellites)*, *Advances in Geophysics*, 4, pp. 217-350, 1958.

3. C. Flammarion, *Astronomie populaire* (1880) et G.C. Flammarion, A. Danjon et autres, *Astronomie populaire Camille Flammarion* (Flammarion, 1955). Les deux classiques de la littérature astronomique française, séparés de trois quarts de siècle, contiennent une documentation inégalée sur l'astronomie du passé. Le livre V de l'édition de 1955 : *Les comètes, météores et météorites* (pp. 331-404), dû à Fernand Baldet, est particulièrement intéressant.

4. M. Eliade, *Traité d'histoire des religions* (Payot, 1964).
5. R. Turcan, *Héliogabale et le sacre du soleil* (Albin Michel, 1985). Ce livre raconte l'histoire de cet empereur démentiel et de sa passion sans limite pour la météorite qui porte son nom. On comprend que tout le monde voulut l'éliminer le plus rapidement possible. Il fut assassiné à 18 ans après une courte vie de folie et de débauche.
6. E.M. Antoniadi, *Uranolithes vénérés*, *L'Astronomie*, 51, pp. 433-436, 1937.
7. Ce document est conservé à la bibliothèque de Strasbourg. Il est cité par Alain Carion dans son livre *Les météorites et leurs impacts* (Masson, 1997), pp. 103-104.
8. M. Maurette, *Chasseurs d'étoiles* (Hachette-La Villette, 1993).
9. E.L. Krinov, *Giant meteorites* (Pergamon Press, 1966).
10. B.M. Middlehurst and G.P. Kuiper (eds), *The Moon, Meteorites and Comets* (University of Chicago Press, 1963). Le chapitre 8, dû à E.L. Krinov, concerne *The Tunguska and Sikhote-Alin meteorites* (pp. 208-234).
11. Muséum National d'Histoire Naturelle (sous la direction de B. Zanda et M. Rotaru), *Les météorites* (Bordas, 1996). C'est le livre paru à l'occasion de l'exposition "*Météorites !*", présentée du 22 mai 1996 au 6 janvier 1997, par le MNHN à la Grande Galerie de l'Evolution au Jardin des Plantes de Paris. Le chapitre 11, "*Des fossiles galactiques*" (pp. 113-121), dû à Ernst Zinner, explique fort bien le problème des anomalies isotopiques et l'origine de météorites comme Allende et Murchison.
12. J.A. Wood, *Meteorites* (pp. 241-250) dans J.K. Beatty and A. Chaikin (eds), *The new solar system* (Sky Publishing Corporation and Cambridge University Press, 1990).
13. L.G. Jacchia, *A meteorite that missed the Earth*, *Sky and Telescope*, 48, pp. 4-9, 1974.
14. Une orbite approximative *post-approche*, calculée à la suite des observations d'août 1972, avait laissé espérer un nouveau passage près de la Terre en août 1997, 25 ans après l'approche record, du bolide du Montana. En fait, une réobservation aurait été quasiment miraculeuse et la tentative de redécouverte a échoué. Il ne faut pas s'en étonner, la période d'observation (101 secondes) étant beaucoup trop courte pour calculer une orbite suffisamment précise, surtout après les perturbations drastiques subies par le bolide durant sa traversée de l'atmosphère terrestre.
15. T. Tsung, *The Jiling meteorite*, *Sky and Telescope*, 56, pp. 465-466, june 1978.

16. Dans son livre *Chasseurs d'étoiles*, Michel Maurette raconte (pp. 62-63) que W. Cassidy dut se battre pour obtenir le financement d'une expédition en Antarctique qu'il avait sollicité dès 1974. Comme trop souvent, les pesanteurs administratives et le jugement négatif de "comités de scientifiques" lui mirent des bâtons dans les roues. C'est seulement après la réussite annoncée des Japonais qu'il obtint ses crédits. Aujourd'hui les résultats obtenus ont remboursé plus de 1000 fois les investissements. La bureaucratie a toujours été un frein à la recherche...
17. O.R. Norton and L.A. Chitwood, *Field guide to meteors and meteorites*, Springer, 2008. Un guide très complet et superbement illustré.
18. D.J. Asher, V. Clube, B. Napier and D.I. Steel, *Coherent catastrophism*, *Vistas in astronomy*, 38, pp. 1-27, 1994. Voir aussi le chapitre 8 (pp. 109-136), qui porte le même titre : *Coherent catastrophism* du livre de D.I. Steel (voir la note 24).
19. G. Kurat et M. Maurette, *Matière extraterrestre sur la Terre : de l'origine du Système solaire à l'origine de la vie* (Michaël Ittah, 1997).
20. D. Bentaleb, *La vie venue de l'espace*, *Science et Vie*, 966, pp. 55-65, mars 1998.
21. M.H. Hey, *Catalogue of meteorites*, third edition (British Museum, 1966). Ce catalogue est constamment actualisé depuis plus de 50 ans. Plusieurs sites internet enregistrent et décrivent les météorites au fur et à mesure de leur découverte. Les météorites sont aujourd'hui un vrai marché, avec des professionnels et des amateurs passionnés prêts à acheter à prix d'or une pièce rare (météorites lunaires et martiennes notamment).
22. G.W. Kronk, *Meteor showers, a descriptive catalog* (Enslow Publishers, 1988). L'ouvrage de référence sur les essaims de météores. Il étudie en détail plus de 80 essaims observables visuellement ou à la jumelle chaque année et décrit les comètes associées.
23. N. Bone, *Meteors* (Sky Publishing Corp., 1993).
24. D. Steel, *Rogue asteroids and doomsday comets* (John Wiley & Sons, 1995). Steel a réétudié en détail le *Complexe des Taurides*, mis en évidence au début des années 1950 par Fred Whipple en collaboration avec l'astronome égyptien Salah El-Din Hamid, confirmant sa réalité et son intérêt.
25. J.G. Burke, *Cosmic debris. Meteorites in history* (University of California Press, 1986). Une superbe histoire de l'étude des météorites avec un système de notes très détaillé. Tous les noms importants sont signalés. Un livre de référence incontournable.

26. O.R. Norton, *Rocks from space* (Mountain Press Publishing Company, 1994). Ce livre est sous-titré "*Meteorites and meteorite hunters*". Richard Norton (1937-2009) est aussi l'auteur du guide de la référence 17.

27. A.H. Delsemme (ed.), *Comets Asteroids, Meteorites - Interrelations, evolution and origins* (University of Toledo, 1977).

28. C. Impey, *The living cosmos*, Cambridge University Press, 2011. Ce livre est sous-titré "*Our search for life in the Universe*". Chris Impey tente de répondre aux questions classiques : « Combien existe-t-il de mondes habitables ? » et « Existe-t-il d'autres civilisations intelligentes ? ».



Figure 6. **Des trésors tombés du ciel**

Ces deux fragments météoritiques, véritables trésors tombés du ciel en 1969, sont composés de matière présolaire et sont donc plus vieux que la Terre elle-même. Allende et Murchison ont révolutionné la connaissance que nous avons de la formation du Système solaire.

CHAPITRE 11

LES ASTROBLÈMES ET LES TECTITES

Il peut paraître bizarre à certains lecteurs d'étudier dans un même chapitre *astroblèmes* et *tectites*. En fait, il n'y a rien de plus logique, puisque l'on sait aujourd'hui d'une manière formelle qu'il y a *liaison génétique* entre les deux (1). Il ne peut y avoir de tectites sans un astroblème qui les a générées.

Une réalité longtemps contestée par les scientifiques

Depuis le début des années 1950, la meilleure des preuves a pu être apportée à cette théorie des impacts d'astéroïdes et de comètes: l'existence de *cratères météoritiques* fossiles à la surface de la Terre elle-même qui ont reçu, en 1960, l'appellation d'*astroblèmes* par le géologue américain Robert Dietz (1914-1995) (2). Ce terme d'astroblème, adopté internationalement, signifie "blessure par un astre". Pratiquement synonymes de nos jours, ces termes d'astroblème et de cratère météoritique se différencient quand même dans la mesure où les premiers sont des formations *fossiles*, souvent de grande taille et malaisées à mettre en évidence du sol, et les seconds des *formations récentes* et de petite taille facilement décelables, sauf s'ils sont totalement cachés par la végétation.

Depuis longtemps, plusieurs astronomes et géologues se doutaient bien que certains petits cratères, éparpillés à la surface de la Terre entière, étaient d'origine cosmique. Parmi ceux-ci, le plus célèbre d'entre eux, le fameux *Meteor Crater* de l'Arizona (qui s'appelait alors simplement la dépression de *Coon Mountain*), était connu depuis des temps immémoriaux des habitants de la région, les Indiens Navajos, qui se l'étaient même "approprié" en récupérant à leur profit le cataclysme responsable et en faisant croire aux Blancs que leurs ancêtres avaient été les témoins oculaires de sa formation, ce qui est exclu puisqu'elle remonte à 50 000 ans.

En règle générale, les scientifiques concernés par ces problèmes d'impacts terrestres étaient tout à fait hostiles à l'idée même d'impactisme. Pour une raison très peu scientifique surtout : accepter l'origine cosmique de certains cratères, c'était accepter aussi les conséquences annexes qui en découlent et remettre en question certains fondements de la géologie, comme l'exclusivité de l'*uniformitarisme* qui avait eu tant de mal à s'imposer au XIX^e siècle au détriment du catastrophisme.

" Plus d'un demi-siècle : c'est le temps qu'il faudra à l'USGS pour admettre l'origine météoritique du Meteor Crater. A travers l'histoire de cette reconnaissance, se joue celle de l'impactisme

et de la prise de conscience par l'homme du lien intime entre la Terre et les autres corps du Système solaire. " (3)

C'est bien cela, en fait, qui était en question. Comme pour le triste épisode des météorites à la fin du XVIII^e siècle, les scientifiques concernés par ces problèmes préféraient se boucher les yeux plutôt que d'admettre l'évidence. Ils prétendaient qu'il n'y avait pas de preuves palpables pour admettre cette possibilité d'impact sur la Terre de gros objets extraterrestres. L'événement de la Toungouska s'étant terminé par une explosion dans l'atmosphère, il paraissait probable que toute collision importante, en admettant qu'il puisse en exister, devait se terminer de la sorte.

Le bombardement cosmique a toujours fait peur, et ce n'est que contrainte et forcée que la communauté scientifique de la fin des années 1940 a fini par admettre l'impactisme et le catastrophisme qui en découle. C'est seulement en 1946 que le nom de *Meteor Crater* fut officiellement adopté par le *United States Board of Geographical Names*, qui reconnaissait par là même définitivement l'origine cosmique du cratère. Les derniers savants réticents durent baisser pavillon les uns après les autres, et en 1953 l'ancienne hypothèse volcanique fut totalement abandonnée et prit place dans l'histoire des sciences.

A partir de 1950, changement de tendance

Heureusement les choses ont bien changé depuis, et tout le monde admet maintenant sans aucune réticence l'explication évidente et de bon sens de ce manque apparent de cratères météoritiques terrestres. Ceux-ci, en effet, sont des formations éphémères, parce que la Terre est une planète vivante sur laquelle tout se transforme rapidement, contrairement à la Lune, astre mort par excellence, qui garde intactes ses diverses formations (mers et cratères) tant qu'elles ne sont pas détruites ou déformées par de nouveaux impacts d'astéroïdes et de comètes. Les cratères terrestres, eux, sont rapidement détruits par une érosion active, comblés par la sédimentation (surtout les formations marines des talus continentaux), profondément modifiés par les actions tectoniques et les impératifs de l'isostasie. Seuls les cratères très récents sont donc aisément décelables.

Sous l'impulsion des géophysiciens et géologues canadiens, puis américains, l'existence de ces astroblèmes en tant que vestiges de collisions cosmiques a pu être démontrée. La découverte du cratère de 3,2 km de diamètre de New Québec au Canada, en 1950, allait être le point de départ d'un vaste programme photographique de recherches sur le territoire canadien, programme qui allait connaître un succès rapide et un peu imprévu par son ampleur. Dès 1954, notamment, le fantastique astroblème de Manicouagan, au Québec, d'un diamètre de 100 km, était identifié sur des photos aériennes. A partir de cet instant, astronomes et géologues comprirent une bonne fois pour toutes que des EGA comme Apollo, Adonis et Hermes, qui avaient frôlé la Terre entre 1932 et 1937, pouvaient fort bien la percuter à l'échelle astronomique.

Très rapidement, le développement des études concernant les astéroïdes est devenu résolument multidisciplinaire (géologie, géophysique, physique, cosmochimie, pétrographie, minéralogie, etc.) (4/5), ce qui a permis d'élargir sensiblement les chances d'identification qui jadis étaient fort minces. Le seul critère ancien sans équivoque était l'existence de fragments de météorites à l'intérieur, ou à proximité immédiate, des cratères. Or, cette présence est l'exception et ne concerne que des petits cratères très récents. Nous verrons qu'en fait un astéroïde est totalement volatilisé lors d'un gros impact et qu'il est donc nécessaire de se baser sur d'autres arguments, notamment sur les effets du *métamorphisme de choc*.

L'histoire du Meteor Crater

La légende des Indiens Navajos

La célèbre excavation météoritique est connue des spécialistes depuis les années 1880 et admise définitivement comme telle depuis 1946 seulement, quasiment soixante ans plus tard. Mais ce cratère a toujours intrigué les hommes (6). Les Indiens de l'Arizona, les Navajos, avant d'être décimés par les Blancs, avaient une légende se rapportant au cratère et à son origine. Cette légende raconte qu'un grand dieu très puissant tomba un jour du ciel sur la Terre. Il s'enfonça très profondément dans le désert où il repose depuis cette époque. La légende (qui en rajoute comme toutes les légendes) rappelle que le dieu déchu avait une haleine infernale qui brûla et détruisit pour longtemps toute la végétation sur une surface immense. La légende précise encore que l'événement eut lieu la nuit et qu'il causa une luminosité prodigieuse et un bruit formidable.

Les premières estimations de l'âge du Meteor Crater remontent au début du XX^e siècle. La méthode dendrochronologique donna un âge de 700 ans pour un vieux cèdre qui poussait au bord du cratère et qui était obligatoirement postérieur à l'impact. Une étude sommaire sur la radioactivité des roches et des débris trouvés dans le secteur de la Coon Mountain indiqua un âge maximal de 5000 ans pour la chute. On prit donc l'habitude de situer entre ces deux limites la date de la catastrophe, en penchant pour une date voisine de 2000 ans, du fait qu'auparavant les Navajos n'habitaient probablement pas la région et ne pouvaient donc pas avoir été les témoins oculaires de la chute de leur dieu, racontée dans leur légende millénaire.

Jusque dans les années 1950, les savants se sont contentés de ces considérations acceptables. Mais les premiers examens approfondis du matériel du cratère et de la région environnante montrèrent rapidement la supercherie. Des datations au carbone 14 dans les années 1960 donnèrent tout d'abord un âge de 24 000 ans pour l'impact, déjà beaucoup trop important pour que la légende ait pu être basée sur une observation réelle. Dans les années 1980, une nouvelle étude très soignée a plus que doublé l'ancienneté du cratère, puisqu'on retient maintenant *un âge de 50 000 ans*. Il faut donc admettre dans le cas du Meteor Crater que le cataclysme, qui saute aux yeux des plus candides observateurs, a été "récupéré" par les

anciens Indiens de la région qui l'ont introduit dans leur tradition orale comme un fait réel et avec force détails.

L'histoire moderne du Meteor Crater

Dans le dernier quart du XIX^e siècle, plusieurs géologues vinrent examiner le cratère de l'Arizona (situé exactement à 35°02'N et 111°01'W, à environ 35 km à l'ouest de Winslow) et connu entre autres sous le nom de *Canyon Diablo Crater* et *Coon Mountain Crater*. Tous furent impressionnés par ses dimensions: diamètre de 1,220 km et profondeur de 180 mètres. Les avis furent partagés sur l'origine de la formation : volcanisme ou impact ? C'est en 1891 que parut le premier article scientifique dû au géologue américain Grove Gilbert (1843-1918), préconisant une origine cosmique (7) et une association avec les nombreux fers météoritiques de la région, éparpillés dans une large zone s'étendant jusqu'à 8 km tout autour du cratère.

Au début du XX^e siècle, en 1903, Daniel Barringer (1860-1929) (8), géologue, ingénieur des mines et homme d'affaires, obtint une concession pour exploiter industriellement le cratère. Des sondages, sans cesse ralentis par l'envahissement des eaux souterraines, montrèrent que les rochers du fond du cratère sont broyés sur une épaisseur supérieure à 100 mètres, et firent croire qu'une sidérite énorme, d'une masse de l'ordre de 10 millions de tonnes, était enterrée à une profondeur de 400 ou 500 mètres sous la périphérie sud du cratère. Mais l'entreprise fut un échec cuisant et entraîna quasiment la ruine pour le propriétaire. Dès 1908, cinq ans après le début du chantier, il fallut arrêter les travaux. Une société au capital de 850 millions de dollars prit le relais en 1920, toujours sous la direction de Barringer, pour tenter d'exploiter ce qu'il croyait encore être un trésor à la portée d'outils industriels modernes. Les estimations, résolument optimistes pour appâter d'éventuels associés acceptant de financer ce qui risquait d'être un gouffre, laissaient croire qu'on pourrait récupérer 9,2 millions de tonnes de fer, 600 000 tonnes de nickel et 200 000 tonnes de cobalt, de cuivre, de platine et d'iridium. En fait, cette entreprise déboucha sur le fiasco le plus total et sur une faillite inéluctable.

Parallèlement à cet essai d'exploitation commerciale, le site du Meteor Crater fut l'objet d'une polémique scientifique acharnée entre les partisans de l'hypothèse cosmique et ceux qui préconisaient l'hypothèse volcanique. Cette polémique dura plus d'un demi-siècle.

Le Meteor Crater aujourd'hui

Tous les spécialistes des cratères d'impact sont venus au Meteor Crater, mais leurs conclusions n'ont pas été nécessairement les mêmes, notamment sur la taille de l'objet responsable. On sait seulement, d'une manière formelle, que son diamètre était inférieur à 100 mètres en entrant dans l'atmosphère, mais pour le fragment majeur, qui a creusé le cratère, les avis varient du simple au plus du double : de 30 mètres à 70 mètres.

Le géologue-astronome américain Eugène Shoemaker (1928-1997) a été l'un des premiers à étudier le secteur en détail dans le courant des années 1950, débarrassé des préjugés anti-catastrophisme qui étaient encore ceux de ses prédécesseurs d'avant-guerre. Tout de suite, il fut convaincu de l'origine météoritique du cratère. Il pensait qu'il avait été creusé par une sidérite d'une trentaine de mètres seulement et d'une masse de l'ordre de 100 000 tonnes (on était déjà loin des 10 MT que Barringer espérait récupérer et revendre), avec un angle de 30° et une vitesse d'impact voisine de 15 km/s.

Pour expliquer les sidérites qui parsemaient la région au début du siècle, Shoemaker et tous les autres spécialistes qui visitèrent le site supposaient que l'astéroïde originel fut soumis à un échauffement important en entrant dans les couches denses de l'atmosphère, ce qui déboucha d'abord sur une fragmentation partielle de quelques petits morceaux périphériques de taille métrique, qui eux-mêmes éclatèrent en d'innombrables fragments plus petits, ceux-là mêmes qui furent ramassés ensuite par plusieurs générations de collectionneurs tout autour du cratère dans un rayon de 8 km.

L'énergie cinétique de l'astéroïde métallique fut transformée en chaleur (en quelques secondes) juste avant et à l'instant de l'impact. L'impacteur et les roches du cratère furent brisés et vaporisés formant un nuage éblouissant de débris divers, de poussières et aussi d'innombrables gouttelettes de fer et de silice qui retombèrent dans le cratère lui-même et dans ses environs immédiats. Tous les fragments retombèrent en quelques minutes, seule la poussière dut mettre plusieurs jours à se diffuser et se disperser.

L'énergie totale dégagée par l'impact qui a engendré le Meteor Crater reste relativement faible, malgré les conséquences spectaculaires encore bien visibles aujourd'hui, quasiment 50 000 ans après. La combinaison d'un astéroïde de 30 mètres, avec une vitesse de 15 km/s et d'une densité de 7,8, comme le préconisait Shoemaker et quelques autres, débouche sur une énergie cinétique de l'ordre de $1,2 \times 10^{16}$ joules, l'équivalent d'un séisme de magnitude 7,6, comme la Terre en connaît chaque année ou presque.

Si l'on retient cette hypothèse basse pour le diamètre de l'impacteur, il faut noter que le Meteor Crater est sensiblement 40 fois supérieur à celui de l'astéroïde *métallique* responsable. Pour un corps rocheux de densité 3,5 (une chondrite ordinaire), on table en général pour un cratère 20 fois plus important que l'astéroïde responsable. Mais aujourd'hui la majorité des spécialistes des cratères d'impact optent pour un objet plus gros : 50 mètres (avec une énergie de $5,7 \times 10^{16}$ joules), 60 mètres (avec une énergie de $9,9 \times 10^{16}$ joules) ou même 70 mètres (avec une énergie de $1,6 \times 10^{17}$ joules). De tels diamètres expliqueraient mieux celui du Meteor Crater, puisqu'on retombe alors dans le critère normal pour le rapport cratère/astéroïde, soit 20 fois, ce qui est très plausible dans la mesure où la vitesse d'impact était inférieure d'un quart à la vitesse considérée comme "moyenne" (15 km/s au lieu de 20 km/s).

L'espérance de vie des astroblèmes terrestres

Très rapidement, dans les années 1960, les spécialistes sont arrivés à une conclusion un peu étonnante de prime abord, mais qui s'explique en fait fort bien : l'espérance de vie des astroblèmes est très variable selon les régions. Elle est sensiblement plus élevée dans les régions géologiquement stables, notamment sur les boucliers (ce qui explique en partie, par exemple, le nombre relativement important de cratères canadiens), que dans les régions où la vie géologique est mouvementée.

Ce qu'il faut retenir principalement, c'est qu'un petit cratère de quelques dizaines de mètres est immédiatement "gommé" de la surface terrestre, ou devient totalement indécélable en quelques centaines d'années. Tous les cratères météoritiques de 1 km ou moins sont des formations quaternaires ou tertiaires, c'est-à-dire des formations très récentes à l'échelle géologique. Cela explique parfaitement le nombre très déficitaire des cratères terrestres, comparativement à ceux de la Lune, de Mars ou de Mercure.

En règle générale, on estime actuellement l'espérance de vie moyenne d'un astroblème terrestre de la façon suivante :

- 1 million d'années environ pour un cratère de 1 km de diamètre ;
- quelques millions ou dizaines de millions d'années pour un cratère de quelques km de diamètre ;
- quelques centaines de millions d'années pour un cratère de plus de 10 km de diamètre ;
- 1 ou 2 milliards d'années pour un cratère de 100 km ou plus de diamètre.

La première conclusion importante est qu'il n'existe plus sur Terre aucun astroblème plus ancien que deux milliards d'années. Toutes les formations (sans aucun doute très nombreuses) d'origine cosmique remontant aux deux premiers milliards d'années de la Terre ont disparu définitivement. Il faut noter cependant que certains points d'impacts possibles très anciens, baptisés globalement *astrons*, repérés par les satellites d'observation de la Terre à la limite de la visibilité, pourraient être également des marques de cicatrices causées par des objets célestes. On en connaît une vingtaine, mais ces *astrons* sont trop vieux pour être étudiés comme des astroblèmes classiques, toute trace de métamorphisme de choc ayant à jamais disparu.

Il faut aussi noter que certains astroblèmes de grande taille, relativement jeunes (quelques dizaines de millions d'années seulement), sont quasiment indécélables. C'est le cas surtout de formations partiellement maritimes qui sont envahies par les eaux et comblées par une sédimentation à la fois marine et fluviale. Un grand astroblème, comme celui de Chesapeake Bay sur la côte est des États-unis, large de 90 km et vieux de 35 MA, a été décelé en 1992 seulement.

Formation et identification des cratères météoritiques et des astroblèmes

Deux formations différentes selon la taille de l'impacteur

La formation des cratères d'origine cosmique est différente selon leur taille. Pour les petits cratères de moins de 100 mètres de diamètre, la destruction du sol est mécanique. Ils sont formés par des corps de faible masse, dont la vitesse d'impact n'excède pas 1 ou 2 km/seconde. De nombreux fragments de l'objet initial existent souvent dans les talus de débris rocheux qui entourent ces cratères et à l'intérieur même de ces cratères. L'importance du phénomène est à la mesure de l'énergie dégagée : tout à fait insignifiante, même à l'échelle régionale.

Il n'en va pas de même pour les cratères de plus de 100 mètres et qui peuvent dépasser 100 km dans certains cas. La destruction est alors *explosive* et le corps céleste (même s'il s'agit d'une sidérite) est totalement vaporisé au cours de l'impact. C'est ce qui explique que l'on ne retrouve que des débris insignifiants de l'objet initial. En touchant le sol, celui-ci connaît une décélération exponentielle extrêmement rapide, qui s'amortit sous la surface terrestre à une profondeur égale à quelques fois son propre diamètre, et qui provoque des ondes de choc très puissantes. La pression ainsi créée instantanément peut atteindre, lors de certains impacts très importants, celle que l'on doit trouver au centre de la Terre (plus de 10 mégabars).

Cette phase de compression des roches dans la zone atteinte par les effets du choc est suivie de deux autres phénomènes importants : l'écoulement hydrodynamique et la dispersion explosive du matériel comprimé. Un impact sérieux entraîne donc obligatoirement la vaporisation, la fusion, la bréchification, le métamorphisme de choc et la fracturation d'un volume de roches qui peut être assez impressionnant. Il convient d'insister sur le fait que tout se passe très rapidement : *en moins d'une minute* tout est fini, le temps que le sol revienne à sa pression normale.

Dans les environs du cratère, on trouve des roches fondues, particulièrement des sables de quartz et des verres de silice : les *impactites*. Celles-ci sont les roches du cratère transformées physiquement et chimiquement par les ondes de choc. J'en reparlerai plus loin pour expliquer ce qui les différencie des *tectites*.

Depuis le début des années 1960, de nombreux travaux ont été consacrés à la recherche de critères utilisables pour l'identification possible d'impacts, en l'absence de débris météoritiques. Parmi les plus caractéristiques de ces critères d'identification, outre évidemment la forme particulière du cratère et ses rebords saillants, on peut d'abord citer les *cônes de pression* (les *shattercones*). Il s'agit de déformations coniques couvertes de stries rayonnantes et branchues qui vont de 1 cm à plus de 12 mètres. Elles sont provoquées par l'onde de choc sur les roches et ont leur apex dirigé vers la source de

pression. Ces cônes de pression sont très reconnaissables, et ils n'existent que comme conséquence d'impacts sérieux. Aucun cataclysme terrestre, même très énergétique, n'est capable d'en produire. Il s'agit donc d'un critère significatif, une "marque de fabrique" en quelque sorte.

Dans le domaine géophysique, il faut citer dans le cas de grands cratères, d'importantes anomalies gravimétriques, correspondant au contraste entre le remplissage du cratère par des brèches lors de la retombée des débris après l'explosion et l'environnement non choqué. Certaines anomalies du champ magnétique peuvent être également mises en évidence sur le plan local.

Le métamorphisme de choc

Mais c'est surtout le *métamorphisme de choc* qui a renouvelé les critères d'identification des impacts météoritiques. L'existence de très hautes pressions, pouvant dépasser 1000 kbar, et de très fortes températures, pouvant dépasser 5000°C, entraînent obligatoirement de très nombreuses altérations des matériaux originaux. Les roches soumises à de hautes pressions de choc subissent des déformations microscopiques que l'on peut mettre en évidence. Les spécialistes ont noté des changements de phase à l'état solide, ainsi deux variétés denses de pression du quartz, la *coesite* (densité 2,93) et la *stishovite* (densité 4,28) ont été retrouvées dans certains cratères météoritiques ou à leur proximité immédiate. Enfin, les très fortes pressions et températures entraînent une fusion sélective ou complète et une vitrification des minéraux initiaux. Seuls les impacts d'objets cosmiques importants peuvent créer ces pressions et températures extraordinaires et leurs sous-produits. On essaie donc de les mettre en évidence dans les cratères d'impact supposés.

A partir de 1957, dans le cadre des explosions nucléaires souterraines, les savants américains ont créé plusieurs cratères *artificiels*, fort ressemblants sur le plan morphologique aux cratères d'impact. Le cratère artificiel le plus important a été "fabriqué" en juillet 1962, par l'explosion la plus énergétique de la série, connue sous le nom de "*événement de Sedan*". L'explosion de 100 kilotonnes placées à 192 mètres de profondeur, dans une zone d'alluvion du désert du Nevada, a produit un cratère de 400 mètres de diamètre et d'une profondeur maximale de 110 mètres. Tous ces cratères artificiels ont été étudiés en détail par les spécialistes des astrolèmes, dans le but de comprendre les modifications et les déformations subies selon la nature du terrain sinistré.

La preuve moderne : les spinelles nickélifères

La preuve imparable de la réalité d'impacts d'astéroïdes et de comètes sur la Terre a été apportée dans les années 1980. Outre l'iridium et les quartz choqués qui sont des marqueurs importants, les spécialistes ont mis en évidence une nouvelle espèce minérale de la famille de la magnétite : les magnétites nickélifères appelées *spinelles* (9/10). Ce sont des minéraux très particuliers dont la formation nécessite la fusion à une température

supérieure à 1300 °C d'un matériel cosmique fortement nickelifère dans une atmosphère riche en oxygène. Comme toujours durant la traversée de l'atmosphère à grande vitesse, la surface externe de la météorite s'échauffe et subit la classique *ablation aérodynamique*. De fines gouttelettes de matière en fusion deviennent provisoirement autonomes et s'oxydent rapidement au contact de l'atmosphère, cristallisant les magnétites nickélifères. Ces agglomérats de cristaux finissent par retomber à la surface terrestre et se mélangent alors aux autres résidus de l'impact.

Les spinelles se présentent sous la forme de pyramides octaédriques pour les monocristaux et sous la forme de motifs cruciformes ou étoilés pour les macles (qui sont des assemblages de plusieurs cristaux). Leur taille est microscopique : de 1 à 50 micromètres en général.

Les chercheurs ont fait cette découverte remarquable : leur composition dépend de la pression d'oxygène, donc de l'altitude à laquelle s'est effectuée l'oxydation. Les spinelles ne se forment donc pas à la surface terrestre et ne peuvent être des minéraux terrestres comme les autres. Leur présence signifie une association avec un impact cosmique, car les spinelles sont des *vestiges de la météorite*. Partout donc où l'on découvrira des spinelles, on saura qu'il y a eu un cataclysme d'origine cosmique. Ainsi la présence de spinelles dans la fameuse couche K/T riche en iridium a confirmé d'une façon quasi certaine l'hypothèse de l'impact cosmique au détriment de l'hypothèse volcanique concurrente.

Relations entre les impacts d'astéroïdes et les astroblèmes

Une formule très simple permet de se faire une idée assez précise du rapport existant entre les cratères météoritiques et les astéroïdes responsables. Des calculs théoriques assez complexes ont montré que la formule $\frac{1}{2} \text{diamètre} = \sqrt[3]{\text{masse} \times \text{vitesse}^2}$ donne une bonne approximation du diamètre d'un cratère météoritique formé comme résultat de l'explosion au point d'impact. L'énergie d'un impact et le diamètre du cratère qui en résulte dépendent donc principalement de la masse de l'astéroïde et de sa vitesse au moment de l'impact. Il faut cependant prendre en considération d'autres données, comme la nature physique de l'objet cosmique (qui peut être assez différente) et celle du substrat terrestre choqué, si l'on veut faire une analyse plus fine.

Dès les années 1960, les spécialistes sont tombés d'accord, pour admettre comme valeur *moyenne*, que la part totale revenant à la *densité* de l'objet cosmique et à sa *vitesse* dans l'énergie d'un impact est de 2×10^6 joules (2 millions de joules). Cette part dans l'énergie correspond à un objet de densité 5,0 et à une vitesse d'impact de 20 km/seconde (66 fois la vitesse du son dans l'air = Mach 66). Elle correspond également aux densités et vitesses suivantes : densité 2,0 et vitesse = 31,6 km/s (cas fréquent pour une *comète* ou un *EGA cométaire* type Oljato), densité = 3,0 et vitesse = 25,8 km/s, densité = 4,0 et vitesse = 22,4 km/s, densité = 6,0 et vitesse = 18,3 km/s,

densité = 7,0 et vitesse = 16,9 km/s, densité = 8,0 et vitesse = 15,8 km/s (cas pour une *sidérite* du type Meteor Crater).

On estime, en *moyenne*, qu'un astéroïde peut créer un cratère d'un diamètre 20 fois supérieur au sien. Dans la réalité, le résultat peut varier d'une manière assez sensible selon la nature de l'objet et celle du substrat choqué, mais il s'agit d'un ordre de grandeur tout à fait acceptable, utilisé d'ailleurs par la quasi-totalité des spécialistes.

Ainsi, on se rend compte qu'un cratère de 1 km peut être creusé par un EGA de 50 mètres seulement au moment de l'impact (de densité 5,0 ayant une vitesse de 20 km/s) ou par une sidérite de même diamètre ayant une vitesse de 16 km/s. L'énergie libérée est de $6,6 \times 10^{16}$ joules, soit l'équivalent d'un séisme de magnitude 7,8. Si la fragmentation ne réduisait pas dans une proportion importante le nombre d'impacts d'EGA de cette catégorie de diamètre, les cratères météoritiques terrestres de quelques centaines de mètres seraient fort nombreux, en dépit de leur très faible espérance de vie.

Un cratère de 10 km est creusé par un EGA de 500 mètres, libérant une énergie de $6,6 \times 10^{19}$ joules. J'ai dit au chapitre 4 que l'équivalence entre les plus énergétiques des cataclysmes purement terrestres et un impact d'EGA se faisait à environ 10^{20} joules pour un EGA de 600 mètres de diamètre moyen. On remarque donc que la formation d'un cratère météoritique de 12 km est comparable à ces très grands cataclysmes, mais aussi que la formation d'un cratère plus petit (même de 10 km de diamètre) libère une énergie *inférieure* à celle d'un grand cataclysme terrestre, ce qui pour beaucoup sera une surprise.

Par contre, tout cratère météoritique de plus de 12 km de diamètre est la trace d'une catastrophe (sur le plan énergétique) de plus grande envergure que celles que l'on a répertoriées à l'époque historique. Un cratère de 20 km, limite inférieure de ce que l'on considère comme un "grand" cratère, est creusé par un EGA de 1 km, diamètre déjà important pour un astéroïde qui frôle la Terre. L'énergie libérée est de $5,2 \times 10^{20}$ joules. Les grands astrolèmes de 100 km de diamètre et plus ont été formés par des objets de 5,0 km et plus. Inversement un NEA "géant" comme Eros, avec son diamètre moyen de 24 km, mais une vitesse d'impact nettement inférieure à 20 km/s, serait capable de creuser un cratère gigantesque de près de 400 km, à condition toutefois qu'il évite la fragmentation en traversant l'atmosphère terrestre, ce qui n'est pas du tout certain.

Les petits cratères météoritiques terrestres certains

Plusieurs catalogues de cratères météoritiques (formations récentes, rappelons-le) et d'astrolèmes (formations fossiles plus difficilement décelables) ont été publiés depuis cinquante ans, toujours plus complets évidemment, toujours plus précis en ce qui concerne l'âge des diverses formations (11/12).

On connaît une vingtaine de petits cratères (ou groupes de cratères associés) certains, aux environs ou à l'intérieur desquels on a retrouvé des débris de météorites. Tous ces cratères (sauf un) ont moins de 60 000 ans et sont donc très récents (à l'échelle astronomique et géologique). Ils ont été formés par des EGA de très petites dimensions, de l'ordre de 60 mètres pour la sidérite qui creusa le Meteor Crater et inférieurs à 10 mètre de diamètre (pour un objet sphérique) pour les cratères de moins de 200 mètres de diamètre. On peut noter qu'un cratère sur deux est double ou multiple, ce qui confirme que la fragmentation dans les couches denses de l'atmosphère est tout à fait courante pour les petits objets cosmiques.

Il est certain que de nombreux autres petits cratères ont été formés sur la Terre depuis 20 000 ans, peut-être une centaine. Quelques-uns restent probablement à découvrir et à identifier (par la présence de météorites associées), mais la plupart sont indécélables depuis longtemps, "gommés" de la surface terrestre.

Les astrolèmes principaux probables

On connaît une cinquantaine d'astrolèmes quasi certains d'un diamètre de 20 km ou plus, c'est-à-dire qui ont été formés par des EGA de 1 km de diamètre au minimum. Leur répartition géographique montre une inégalité très nette entre les deux hémisphères, mais aussi entre les différentes régions. Le Canada se taille la part du lion, ce qui n'est pas une surprise. Même si ce pays se trouve un peu avantagé par rapport à d'autres grandes régions, du fait de l'existence de son bouclier, qui est une région géologiquement très stable, il n'en demeure pas moins que l'important travail de recherche et d'étude des spécialistes canadiens depuis 1950 permet de faire la différence quand on regarde les statistiques. D'immenses territoires comme l'Inde, la Chine, l'Amérique du Sud, l'Afrique doivent aussi receler leur part d'astrolèmes.

Au niveau des âges, on trouve un très large éventail, de deux milliards d'années (2000 MA) pour les plus anciens (Sudbury et Vredefort) à 3,5 MA seulement pour l'astrolème sibérien de Elgygytgyn qui a 23 km de diamètre et qui est parfaitement repérable de l'espace. Plusieurs grands astrolèmes ont moins de 100 MA, notamment le célèbre cratère de Chicxulub, dont je reparlerai dans d'autres chapitres, et qui est daté de 65 MA, en liaison avec la fin de l'ère secondaire.

On ne retient pas moins de six astrolèmes quasi certains ayant eu un diamètre initial de 100 km ou plus. Ce sont par ordre décroissant : Chicxulub (Mexique) avec 180 km, Acraman (Australie) avec 160 km, Sudbury (Canada) et Vredefort (Afrique du Sud) avec 140 km et Popigai (Sibérie) et Manicouagan (Canada) avec 100 km.

Signalons également l'existence de deux paires de grands cratères formés en même temps, suite à une fragmentation tardive de l'objet cosmique responsable : une en Russie, Kara (65 km) et Ust-Kara (25 km) et l'autre au

Québec, très connue, les Clearwater lakes (appelés *east* et *west*) d'un diamètre de 32 et 22 km. Ces deux cas de cratères doubles montrent que la fragmentation est peut-être plus difficile pour les grands cratères que pour les petits, mais qu'elle n'est nullement impossible. On pense aussi que plusieurs fragments d'un astéroïde peuvent participer à la formation d'un *même* cratère, si la fragmentation s'est effectuée à basse altitude, ce qui paraît probable pour des objets ayant une configuration structurale de bonne qualité.

Enfin, parmi ces grands astroblèmes, signalons le cratère français de Rochechouart, dans le Limousin. Il date d'environ 215 MA et avait un diamètre initial de 23 km, ramené aujourd'hui à 15 km. On pense qu'il a été creusé par une sidérite ou une sidérolithe.

Le XXI^e siècle devrait être décisif pour l'identification définitive de nombreuses autres structures d'origine cosmique, notamment dans un premier temps par le repérage de formations totalement invisibles du sol, mais plus ou moins repérables à partir des satellites qui observent la Terre. L'étude sur le terrain pose d'autres problèmes, certains pays n'étant pas partisans que des spécialistes étrangers viennent étudier de trop près leurs possibles astroblèmes.

De nombreux autres astroblèmes plus petits (entre 2 et 20 km) sont connus. Le nombre total d'astroblèmes quasi certains, de l'ordre actuellement de 200, augmente chaque année. Plusieurs catalogues d'astroblèmes existent, certains faisant figurer des structures plus ou moins hypothétiques.

Les astroblèmes terrestres de moins de 40 millions d'années

Le nombre d'astroblèmes de moins de 40 MA augmente continuellement. On répertorie une quarantaine de cratères certains et possibles (c'est-à-dire non encore retenus définitivement car le doute subsiste à leur sujet) (13). Ce sont donc des formations des ères tertiaire et quaternaire. On peut les qualifier de récentes à l'échelle géologique, puisque toutes ont moins de 1/100 de l'âge de la Terre (estimé à 4,6 milliards d'années, rappelons-le).

A l'examen de ce tableau des astroblèmes "récents" (à l'échelle géologique et astronomique, j'insiste bien sur ce point), on se rend compte que la Terre a subi quelques gros impacts depuis moins de 40 MA, même si certains d'entre eux sont contestés pour diverses raisons. Dans l'ordre de la liste, on voit que trois cratères importants sont recensés à -35 MA : le golfe du Saint-Laurent (contesté mais fort possible), Chesapeake Bay, un remarquable astroblème de 90 km de diamètre, très difficile à repérer, mais bien réel (c'est la preuve que certains astroblèmes de grande taille sont eux aussi gommés rapidement par la *sédimentation*) et Popigai, l'astroblème sibérien bien connu de 100 km, creusé par un astéroïde de 5 km de diamètre.

On peut aussi citer les cratères allemands du Nördlinger Ries, de Steinheim et de Stopfenheim Kuppel qui forment un triplet, c'est-à-dire un ensemble de trois cratères liés génétiquement (14). Ces trois formations de 24 km, 3,5 et 8 km respectivement de diamètre sont voisines et alignées. Cet alignement indique presque obligatoirement une origine commune, hypothèse qui est totalement confirmée par le fait que les trois cratères ont un âge identique : 15 MA. Ils ont été creusés par les fragments d'un astéroïde morcelé en traversant l'atmosphère, phénomène quand même moins fréquent pour les gros objets que pour les petits, puisque les cratères doubles (ou triples) de bonne taille sont relativement rares.

Vers -3,5 MA, c'est l'astroblème sibérien de *Elgygytgyn* qui fut formé par un EGA de plus de 1 km de diamètre. Son diamètre est de 23 km, ce qui est déjà important pour un astroblème. C'est le premier gros impact dont furent témoins les premiers *Homo* ou leurs prédécesseurs immédiats, comme je l'expliquerai au chapitre 15. On se doute de l'effroi des témoins rescapés devant un cataclysme de cette ampleur.

Dernier très grand cataclysme, celui qui a créé l'astroblème de Wilkes Land, il y a 700 000 ans. Je reparle plus loin de cette formation, génitrice de la très importante famille de tectites connue sous le nom générique des *australasites*.

Enfin, il faut signaler deux cratères très récents, celui de *Sithylemenkat* (15) en Alaska, vieux de 12 000 ans et d'un diamètre de 12 km, et celui de *Köfels* (16) en Autriche, vieux de 8500 ans seulement et d'un diamètre de 5 km. Ces deux formations, quasi contemporaines, sont contestées mais en fait elles sont probables. J'en parlerai au chapitre 19, car elles font partie de "l'histoire cosmique des hommes". De nombreux indices postulent en leur faveur.

Il faut également signaler que pratiquement aucun EGA *cométaire* et de nombreux EGA planétaires qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre ne participent pas à la cratérisation, du fait de leur désintégration avant de toucher le sol. Il y a là une importante source de déficit sur le nombre exact des impacts d'astéroïdes et de comètes sur notre planète.

Enfin, on sait que la Terre est une planète essentiellement océanique, puisque 71 % de sa surface concernent des océans et des mers, et il est bien évident que 7 impacts sur 10 ont lieu dans des régions immergées. On peut d'ailleurs, semble-t-il, espérer pouvoir identifier dans l'avenir quelques formations marines avec les moyens modernes d'investigation.

Pour toutes ces raisons, les statistiques actuelles sur les astroblèmes récents sont loin de refléter la fréquence exacte des collisions entre les corps d'origine cosmique et notre planète. Je rappelle ce qui a été dit au chapitre 4 au sujet des météorites de l'armée américaine : quasiment chaque mois un objet de 10 mètres de diamètre moyen entre dans l'atmosphère terrestre.

De toute manière, la conclusion est claire : l'impactisme terrestre existe encore de nos jours à l'échelle astronomique et géologique, même si ses effets sont moins sensibles à l'échelle humaine. Ses conséquences ont toujours été très importantes comme nous le verrons en détail dans plusieurs chapitres ultérieurs. La Terre, la vie, l'évolution des espèces, l'histoire des hommes ont été tributaires des cataclysmes cosmiques.

Quelques astroblèmes géants hypothétiques

En dehors des astroblèmes probables ou seulement possibles, il reste de nombreuses formations que l'on peut qualifier de douteuses, de problématiques ou d'hypothétiques, de toutes dimensions, pour lesquelles certains auteurs ont proposé (sans preuves) une origine cosmique. Sans tomber dans "l'astroblémophilie" ou "l'astroblémomanie", pour reprendre deux termes utilisés par Théodore Monod (1902-2000) dans les années 1960 pour les dénoncer (17) et pour marquer son inquiétude " *de voir se gonfler inutilement la liste des astroblèmes de toutes les apparences circulaires que peut fournir un atlas* ", il faut cependant dire quelques mots de certains de ces astroblèmes hypothétiques.

C'est surtout l'ingénieur et géologue belge René Gallant (1906-1985) (18), l'un des pionniers dans ce domaine, qui a proposé de nouvelles formations insoupçonnées jusque-là et qui a été peut-être un peu loin. Mais il serait très exagéré d'avancer que toutes ses propositions sont erronées, et l'avenir lui donnera certainement partiellement raison. Je me limiterai ici aux formations géantes de 100 km et plus.

Comme astroblèmes géants possibles, mais non encore prouvés, des chercheurs soviétiques ont signalé (19) en 1975 la partie nord de la mer Caspienne, qui pourrait être une vaste cuvette d'origine cosmique de 400 km de diamètre, et une importante dépression dans le Kazakhstan, centrée sur le lac Tengiz près de Tselinograd, qui a une bonne chance d'être un très vieux astroblème de 350 km de diamètre. Ces chercheurs ont également causé une vive surprise en annonçant que le lac Balkhach pourrait être un astroblème double : la partie sud du lac serait un astroblème de 285 km et la partie est un astroblème de 315 km.

Au Canada, il y a une formation reconnue depuis 1953 que l'on considère comme une partie émergée d'astroblème. C'est l'arc des îles Nastapoka (20), connu aussi comme l'arc de la baie d'Hudson. Cette formation, très caractéristique vue de l'espace, aurait eu un diamètre initial de 440 km, mais la plus grande partie est aujourd'hui recouverte par les eaux de la baie d'Hudson.

En 1964, Gallant a proposé comme astroblèmes possibles deux formations encore plus grandes : la mer du Japon (800 km) et le golfe de Campêche qui a un arc caractéristique bien connu et qui pourrait être un ancien astroblème de 650 km aujourd'hui immergé. Comme formations plus petites, il a proposé le golfe des Mosquitos, formation également bien arquée sur la

mer des Antilles et qui pourrait correspondre à un vestige d'astroblème de 300 km, la baie d'Ungava au Canada (240 km), ainsi que plusieurs autres formations maritimes, notamment en Argentine et en Antarctique. C'est cette prolifération, peut-être un peu démesurée (seul l'avenir le dira), qui a poussé Théodore Monod à parler ironiquement d'*astroblémomanie*.

Mais il ne faut pas perdre de vue que tout impact d'origine cosmique entraîne la formation d'une dépression proportionnelle au diamètre. La profondeur atteint souvent plusieurs centaines de mètres, et il est bien évident que ces cuvettes sont des formations rêvées idéales comme réceptacles aquatiques. De nombreux lacs et aussi des arcs côtiers anormaux sont, à coup sûr, d'origine cosmique. Il n'est pas exclu non plus que d'autres éléments arqués importants, caractérisant le relief de l'écorce terrestre, soient liés à des cratères d'impact anciens, notamment certaines guirlandes d'îles et des fosses océaniques. Enfin, rappelons l'existence d'une vingtaine d'*astrons*, astroblèmes à la limite de la visibilité et dont il n'est plus possible de vérifier l'origine, toute trace de métamorphisme d'impact ayant été éliminée par le temps.

L'identification des formations d'origine cosmique a fait un bond fantastique durant la seconde partie du XX^e siècle, mais on peut être sûr qu'à la fin du XXI^e siècle, nos listes actuelles d'astroblèmes paraîtront bien désuètes. Nos successeurs ont du pain sur la planche !

Les tectites, un mystère définitivement élucidé

Les *tectites* (21) (du grec *tectos*, qui signifie fondu) sont des petites pierres vitreuses qui ressemblent aux obsidiennes (verres naturels formés lors de certaines éruptions volcaniques), mais qui diffèrent de toutes les laves terrestres par leur composition chimique. Ces tectites ont longtemps constitué un mystère pour les astronomes et les spécialistes des météorites.

La première allusion les concernant dans la littérature scientifique remonte à 1787. Elles étaient alors considérées comme une catégorie spéciale de verres volcaniques et parentes lointaines des obsidiennes. Les tectites furent étudiées en 1844 par Charles Darwin (1809-1882), le célèbre naturaliste britannique, qui pensait être en présence de bombes volcaniques. Leur nom fut donné en 1900 par le géologue autrichien Eduard Suess (1831-1914) qui voyait en elles des météorites vitrifiées.

De nombreuses autres hypothèses ont été envisagées pour expliquer l'origine des tectites : objets vitreux d'origine humaine, résidus d'une planète du Système solaire ou d'une comète, fulgurites (sables fondus sous l'effet de la foudre), fragments du sol lunaire projetés sur la Terre lors de l'impact d'astéroïdes ou de comètes sur notre satellite, ou même restes de laves projetées vers la Terre par l'activité volcanique lunaire. Cette dernière hypothèse a eu quelques partisans jusqu'à la fin des années 1970, mais elle ne résiste pas à l'analyse, puisqu'elle sous-tend que la Lune est encore un

astre géologiquement actif, ce que les différentes missions Apollo ont formellement démenti.

La seule hypothèse qui résiste à un examen poussé, et qui est aujourd'hui universellement retenue, est d'ailleurs de loin la plus simple et la plus logique : les tectites sont des fragments de roches sédimentaires terrestres, arrachés du sol lors d'importants impacts météoritiques, *fondus* sous l'effet du choc et figés sous leur forme vitreuse à la suite du refroidissement brutal qu'ils subissent pendant leur trajet dans l'atmosphère, entre le cratère d'impact dont ils sont issus et leur site définitif.

Certains spécialistes ont eu tendance à associer dans un groupe unique les *impactites* et les *tectites*. C'est une erreur et il est nécessaire d'examiner ce qui les différencie.

Mécanisme de formation des impactites et des tectites

On a reconstitué de la manière suivante la formation des impactites et des tectites. Sous l'action de la violente onde de choc provoquée par l'impact, les roches du substrat choqué subissent diverses transformations. Un certain volume de roches est vaporisé, un autre fondu (à plus de 2500° C), un autre pulvérisé, un autre enfin seulement brisé et concassé.

Tout ce matériel est projeté dans l'atmosphère à des altitudes différentes, de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres. Le matériel solide et une partie du matériel fondu retombent dans le cratère ou à sa proximité immédiate, pour former les *impactites* qui ont souvent des formes tourmentées et très irrégulières. Ces impactites sont donc des fragments minuscules (quelques grammes ou dizaines de grammes) des roches préexistantes du substrat choqué, mais transformées physiquement et chimiquement par le métamorphisme de choc. Ces transformations sont maximales là où les pressions et les températures sont les plus élevées. Les transformations sont moins sensibles pour les zones périphériques du substrat choqué, là où les pressions et les températures sont inférieures.

Mais durant la projection des roches du cratère, tout le matériel ne retombe pas à proximité immédiate de ce cratère. Les gaz et la matière vaporisée montent davantage dans l'atmosphère, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres, en compagnie d'une partie du matériel fondu. Celui-ci retombe sur Terre dans des sites plus ou moins éloignés selon la violence de l'éjection, mais toujours de quelques centaines de kilomètres au moins de leur point de départ, c'est-à-dire du *cratère parent*, pour former ce que l'on appelle les *tectites* au sens strict. Les tectites sont donc *toujours* séparées du cratère dont elles sont issues, et elles ont subi ce que l'on appelle l'ablation aérodynamique durant leur traversée de l'atmosphère. Le résultat est que les vraies tectites sont *toutes* des objets de forme régulière : disques, objets en forme de poires, de larmes et d'haltères, évoquant les gouttes d'un liquide visqueux figées brutalement.

On a découvert également des *microtectites* (diamètre inférieur à 1 mm), lors de carottages océaniques en eau profonde. Cette découverte inattendue est tout à fait intéressante, elle a permis d'élargir considérablement les sites de tectites, qui sont en réalité beaucoup plus vastes que ce qu'on imaginait jusqu'alors. Il faut savoir que les EGA tombent sur Terre avec un angle incident qui peut être considérable et que, par conséquent, l'éjection des roches du cratère se fait avec une trajectoire oblique. La distribution géographique des tectites et des microtectites, plus ou moins en éventail, permet de repérer le cratère parent ou du moins la région où il devrait se trouver.

En conclusion, il faut retenir ce fait très important : l'existence même des tectites est la preuve de la réalité de l'impactisme terrestre. Pour chaque famille de tectites, il y a (ou il y a eu) obligatoirement un cratère parent. La formation de tectites nécessite un cratère parent d'au moins 10 km de diamètre, alors que la formation d'impactites ne nécessite qu'un cratère et une énergie libérée beaucoup plus modestes.

Par contre, il faut signaler que plusieurs grands cratères d'impact récents n'ont apparemment pas engendré de tectites. Il y a là un problème non résolu. On a notamment essayé d'associer, mais sans succès, un des champs de tectites connus à l'astroblème géant de Popigai qui date de 35 ± 5 MA. La cratérisation a été extraordinairement énergétique (7×10^{22} joules) et la masse de produits éjectés tout à fait considérable, mais rien n'a été encore retrouvé qui puisse correspondre à ces débris. Au point même que certains spécialistes croient qu'une grosse partie de ces débris a été provisoirement satellisée ou a même échappé à l'attraction terrestre.

Les familles de tectites et les astroblèmes associés

On connaît depuis longtemps quatre grands groupes de tectites et on a songé, dès que possible, à les associer à des cratères parents. Cette liaison *génétique* a pu être établie dans les années 1960 pour deux des quatre groupes.

Les tectites de Côte-d'Ivoire, connues sous le nom d'*ivoirites*, ont le même âge que le lac-cratère de Bosumtwi au Ghana, soit $1,0 \pm 0,1$ MA. Les tectites d'Europe centrale, connues sous le nom de *moldavites*, ont exactement le même âge que le cratère allemand de Nördlinger Ries, soit $15,0 \pm 0,5$ MA. La parenté pour ces deux familles ne fait pas de doute.

Pour les deux autres champs de tectites, les choses sont beaucoup plus difficiles à établir, comme je vais l'expliquer dans les deux sections suivantes, mais il semble que le cas des tectites américaines, connues sous le nom de *bédiasites* et de *georgites*, ait été résolu récemment. Pour les *australasites*, les tectites les plus récentes, et qui datent de seulement 700 000 ans, pratiquement tout reste à faire, et comme nous le verrons dans plusieurs chapitres ultérieurs, la vérité s'annonce extraordinaire, si

extraordinaire qu'elle entraîne un nouveau verrou psychologique, comme ce fut déjà le cas pour les météorites et les astroblèmes et qui retarde les recherches elles-mêmes.

Avant d'étudier les deux dernières familles de tectites, il faut revenir un instant sur cette énigme qui étonne astronomes et géologues : pourquoi n'y a-t-il que quatre grandes familles de tectites, alors que les astroblèmes existent par centaines, même si 200 environ sont actuellement recensés de façon certaine ? Le problème présente deux aspects : quel est l'âge maximal possible de "survie" des tectites ?, et quelle est l'énergie minimale nécessaire au moment de l'impact pour qu'il y ait effectivement formation de tectites ?

L'impact dont résultent les tectites de Côte-d'Ivoire semble avoir été assez anodin (EGA de 500 mètres de diamètre) et correspond pratiquement au minimum dont nous avons parlé : cratère parent de 10 km et énergie libérée de l'ordre de 7×10^{19} joules. Donc, théoriquement, tous les astroblèmes de plus de 10 km ont été capables d'engendrer des tectites. Théoriquement seulement, car un cratère récent (1,1 MA), celui de Zhamanshin en ex-URSS n'a, lui, été capable que d'engendrer des impactites (les *irgizites*, considérées à tort par plusieurs auteurs comme la cinquième grande famille de tectites).

D'autre part, on sait que les tectites les plus anciennes ont 35 MA. On peut penser que les tectites ne se conservent pas plus de 50 MA, et il n'y a sans doute rien d'anormal à ce que l'on n'en ait pas découvert de plus anciennes. Il est probable que la multiplication des carottages en eau océanique profonde permettra de découvrir des microtectites anciennes, liées génétiquement à d'autres familles que les quatre recensées à l'heure actuelle. Il ne faut pas oublier enfin que plusieurs cratères récents ont des positions excentrées, dans des régions difficiles d'accès et peu peuplées. Il n'est donc pas tout à fait exclu que l'on retrouve un jour des tectites encore inconnues dans ces régions déshéritées ou dans les océans.

Des *microtectites* ont été découvertes dans la région de l'impact de Chicxulub et elles sont associées avec certitude avec l'impact qui remonte à 65 MA. Mais on n'a trouvé aucune tectite, on peut se demander pourquoi.

Trois cratères parents pour les tectites d'Amérique du Nord ?

Pour bien comprendre la difficulté qu'il y a d'apporter la preuve d'une liaison génétique entre les tectites d'Amérique du Nord et un cratère parent, je rappelle d'abord ce que j'écrivais à ce sujet en 1982 dans la première version de *La Terre bombardée* (p. 151) :

" La parenté est franchement délicate à établir pour les tectites d'Amérique du Nord qui sont les plus anciennes connues (35 x 1 millions d'années). Plusieurs essais ont été tentés pour faire de l'astroblème de Popigai le cratère parent, mais tous ont échoué. Ni l'âge (5 millions d'années d'écart), ni la composition chimique,

ni surtout la distribution géographique de ces tectites ne correspondent et il faut se faire une raison : il n'y a pas de liaison génétique entre les tectites d'Amérique du Nord et Popigai. Depuis la fin des années 1950, plusieurs auteurs ont pensé résoudre le problème en attribuant à la partie sud du golfe du Saint-Laurent, qui a une forme sensiblement circulaire, le rôle de cratère d'impact. Cette formation canadienne est pratiquement la seule possible par sa taille (290 km de diamètre) et surtout par ses coordonnées pour expliquer la distribution géographique de ces tectites et microtectites qui existent dans le Maine, au Texas, en Floride, à Cuba et dans la mer des Caraïbes. En fait, le champ de ce groupe vient d'être considérablement augmenté par la découverte de microtectites associées dans plusieurs sites du Pacifique et même dans l'océan Indien. Il a pu concerner la moitié de la surface terrestre et près de 1000 milliards de tonnes de microtectites ont dû être réparties dans cette surface tout à fait considérable. Bien que l'hypothèse du golfe du Saint-Laurent soit toujours contestée, elle reste très plausible. Le cratère a totalement été oblitéré par l'âge et par la sédimentation très importante dans cette région et il ne peut être étudié comme un astroblème classique. Ce qui crée, évidemment, pour le moment, de sérieuses difficultés pour prouver qu'il s'agit bien d'une formation d'origine cosmique. Mais ne l'oublions pas : il y a eu obligatoirement un cratère géant pour engendrer cette masse énorme de microtectites et le golfe du Saint-Laurent est le mieux placé pour avoir été celui-là. "

Les choses se sont à la fois éclaircies et compliquées depuis la rédaction de ce texte. Éclaircies, parce que l'on a découvert un cratère qui peut fort bien convenir comme cratère parent : celui de *Chesapeake Bay* (22/23), et compliquées parce que ce sont aujourd'hui quatre grands cratères qui ont une ancienneté soupçonnée de 35 MA. Voyons ce problème de cratérisation multiple.

La découverte du grand cratère de *Chesapeake Bay* (90 km), doublée du cratère océanique de *Tom's Canyon* (20 km), laisse à penser que le problème des tectites américaines est résolu. Mais celui du golfe du Saint-Laurent reste entier et l'origine cosmique plausible, et même probable selon quelques sondages dans le secteur. Le fait que ces deux grands cratères ne soient pas décelables selon les critères habituels ne doit pas surprendre. Tous les astroblèmes maritimes et côtiers, on l'a bien compris avec Chicxulub (voir le chapitre 12), doivent être traités en prenant en compte un autre agent, extrêmement efficace à long terme, qu'est la sédimentation, qui cache à la vue simple des chercheurs et des satellites le substrat choqué en très peu de temps (quelques milliers d'années seulement).

Le problème s'est encore compliqué du fait que l'astroblème de Popigai, jadis daté à 30 MA, a été vieilli et est daté maintenant de 35 ± 5 MA. L'âge

médian est le même que les trois autres cratères certains ou soupçonnés. Nous sommes donc en présence de *quatre* cratères, dont trois très grands ($d > 80$ km) creusés par des objets célestes d'au moins 4 km chacun (et même beaucoup plus pour celui du golfe du Saint-Laurent), pour la frontière Éocène-Oligocène. Popigai est-il vraiment contemporain des trois autres ? Sa position géographique et la composition du substrat choqué avaient déjà parues rédhibitoires pour une parenté avec les tectites d'Amérique du Nord, comme le rappelle l'extrait rappelé plus haut. Mais par contre on s'étonnait, à juste titre, que Popigai n'ait pas produit sa propre famille de tectites.

Il faudra attendre encore pour résoudre cet irritant problème. Mais maintenant il y a trop-plein d'astroblèmes pour expliquer l'existence des *bédiasites* et des *georgites*, et aussi la multitude de microtectites associées qu'on a trouvées dans l'Atlantique, mais aussi dans le Pacifique et l'océan Indien.

Le problème des tectites d'Australasie

Les *australasites* sont le nom générique de la principale famille de tectites qui regroupe plusieurs sous-familles : les *indomalaysianites*, les *indochinites*, les *philippinites* et les *australites*, représentant à elles toutes près de trois millions de spécimens différents, parmi lesquels moins de 100 000 ont été étudiés en détail. Leur dispersion géographique laissait croire, avant les possibilités de datation précise, que ces variétés régionales n'avaient rien en commun et correspondaient à des sources différentes, d'âge différent. En fait, il n'en est rien, les diverses datations modernes ont montré sans aucune ambiguïté que toutes ces tectites ont exactement le même âge et qu'elles ont été engendrées par un cataclysme *unique* (mais peut-être un objet *morcelé* au moment de l'impact) d'une puissance fantastique.

Les tectites et les microtectites d'Australasie sont très probablement liées à un événement d'origine cosmique de première importance en ce qui concerne la Terre. Il n'est pas exclu que cet événement, vieux d'environ 700 000 ans, soit même le plus important de l'ère quaternaire, puisqu'il est lié à la dernière inversion totale du champ magnétique terrestre.

Comme toujours, quand il y a un cataclysme mystérieux comme celui-là, les savants des différentes disciplines sont extrêmement divisés, à la fois sur l'origine, les preuves terrestres et les conséquences de l'impact. Cela n'a jamais été si vrai que dans le cataclysme qui nous occupe ici. La seule preuve vraiment irréfutable est l'existence des tectites. Qui dit *tectites* dit obligatoirement *impact*, et dans le cas présent, impact majeur du fait de la dispersion géographique très importante des résidus. Jusque-là, tout le monde peut s'accorder. Mais le premier sujet de discorde concerne le cratère parent : où est-il ? Il est à la fois très récent, puisque d'un âge équivalent à celui des tectites, soit 700 000 ans, et inconnu.

En 1976, le géologue américain John Weihaupt proposa une hypothèse séduisante, et apparemment très solidement étayée : le cratère existerait

sous les glaces de l'Antarctique, dans la région de Wilkes Land (24/25), déjà soupçonnée d'ailleurs dès la fin des années 1950 à la suite de deux expéditions travaillant séparément, l'une française et l'autre américaine. En effet, la distribution des tectites d'Australasie laissait supposer une origine antarctique probable. Le cratère fantôme, connu maintenant sous le nom de *Wilkes Land*, serait en fait un cratère géant de 240 km de diamètre et d'environ 850 mètres de profondeur et serait situé dans une zone montagneuse haute de 2300 à 2600 mètres au-dessus du niveau de la mer. Sa position serait centrée sur 71°30'S et 140°00'E, autant dire dans une région difficilement accessible, mais par contre particulièrement intéressante puisqu'elle présente un assemblage inhabituel d'anomalies géologiques et géophysiques. C'est surtout une analyse poussée des anomalies gravimétriques très importantes dans cette région qui aurait permis à Weihaupt d'obtenir la confirmation de l'existence du cratère parent des australasites, mais également une vingtaine d'autres raisons plus ou moins convaincantes.

Plutôt moins que plus, semble-t-il, car les résultats de Weihaupt ont été très sérieusement critiqués, et aujourd'hui de nombreux géologues et géophysiciens ne veulent pas entendre parler de cratère antarctique. Ils n'aiment pas les cratères fantômes et refusent d'y croire. Pourtant seul un cratère situé dans la région de Wilkes Land peut expliquer la distribution des australasites, et il n'y a aucune raison pour que ce continent de glace soit épargné. Le diamètre retenu par Weihaupt, 240 km, paraît colossal à première vue, et il est peut-être un peu exagéré, même s'il correspond aux anomalies gravimétriques signalées plus haut. Car pour creuser un cratère d'un tel diamètre, celui de l'EGA responsable aurait dû être de l'ordre de 12 km, la masse voisine de $4,5 \times 10^{12}$ tonnes et l'énergie cinétique de la collision de l'ordre de 9×10^{23} joules, si l'on s'en tient aux valeurs moyennes en ce qui concerne la densité de l'objet et la vitesse d'impact.

Seuls trois NEA actuellement connus dépassent ce diamètre de 12 km (Ganymed, Eros et Don Quixote), aucun d'eux n'étant actuellement de type Apollo et susceptible donc de croiser l'orbite terrestre. Mais d'un autre côté, il ne faut pas oublier que la zone de distribution en éventail des australasites (tectites et microtectites) est de l'ordre de 10 000 x 6000 km, ce qui est considérable (et unique), et montre bien l'extrême violence de l'impact, si l'impact a été unique.

Les adversaires de l'option antarctique pour le cratère parent sont restés quasiment sans voix jusqu'à présent, en dehors de leurs critiques. Comme il leur faut trouver un cratère de rechange, un petit cratère à la frontière du Laos a été proposé, mais il n'explique pas, loin s'en faut, la totalité de la distribution géographique des australasites, notamment des *australites* qui n'ont strictement rien à voir avec un impact laotien. Le fond du problème est bien là : il est impératif d'expliquer le pourquoi de la distribution de *toutes* les sous-familles d'australasites.

Reste la possibilité astronomique d'un impact multiple, ou en *chapelet* (comme Shoemaker-Levy 9 en 1994 sur Jupiter) qui pourrait peut-être expliquer à la fois la dispersion, l'âge identique des tectites, l'absence de cratère géant, l'inversion géomagnétique et les bouleversements dans la biosphère. Mais la *formation* même des tectites pose alors de sérieux problèmes. Est-il crédible que plusieurs fragments aient pu engendrer leurs propres tectites, sachant, comme je l'ai dit, qu'un diamètre de 500 mètres est l'extrême minimum pour qu'il y ait formation de tectites ? Il faudrait alors penser à un objet à orbite rétrograde (donc d'origine cométaire) à très grande vitesse (60 ou même 70 km/s) au moment de l'impact pour obtenir l'énergie cinétique nécessaire. Si le cratère antarctique n'est pas retrouvé, cette hypothèse pourrait bien être la bonne.

Mais il se pose alors tout de suite la question : " *Où sont les cratères de taille kilométrique, très récents, qui ont généré les tectites ?* ". On en a un seul qui peut correspondre, c'est le cratère laotien. C'est très loin de faire le compte. S'ils avaient existé, ces cratères météoritiques quaternaires seraient encore visibles. Ou alors il faut recourir à une solution ad hoc assez peu satisfaisante : ils sont aujourd'hui sous la mer et comblés par la sédimentation.

Tout reste à faire pratiquement concernant le problème des australasites, et il faudra bien que la communauté scientifique dans son ensemble finisse par s'y intéresser, même si le problème est difficile apparemment. Cet événement majeur de l'histoire terrestre récente, qui s'est produit, rappelons-le, il y a seulement 700 000 ans, a eu des conséquences très importantes, et à ce titre j'aurai à en reparler.

Notes

1. E.A. King, *Space geology, an introduction* (John Wiley & Sons, 1976).
2. Robert S. Dietz fut un pionnier dans l'étude et la reconnaissance des structures d'impact terrestres et devint l'un des grands experts de la question. Son nom reste attaché à celui d'*astroblème* qu'il a choisi pour désigner les cratères météoritiques fossiles.
3. S. Renault, *Les fausses pistes du Meteor Crater*, Ciel et Espace, 317, pp. 74-78, 1996.
4. B.M. French and N.M. Short (eds), *Shock metamorphism of natural materials* (Mono Book Corp., 1968).
5. D.J. Roddy, R.O. Pepin and R.B. Merrill (eds), *Impact and explosion cratering - Planetary and terrestrial implications* (1976).
6. J. Dublin, *A la recherche du dieu du feu des Navajoes*, L'Astronomie, 46, pp. 94-96, 1932. Un recueil de légendes (inventées de toutes pièces) sur l'impact du Meteor Crater.

7. G.K. Gilbert and M. Baker, *A meteoric crater*, Astron. Soc. Pacific Pub., 4, 21, p. 37, 1891. Le premier article laissant entrevoir une origine probable pour le Meteor Crater.
8. K. Mark, *Meteorite craters* (University of Arizona Press, 1987).
9. E. Robin et R. Rocchia, *La disparition des dinosaures*, dans *Les dinosaures*, Dossiers Pour la Science, HS 1, pp. 93-94, 1993. On doit beaucoup à Éric Robin et Robert Rocchia, deux chercheurs français, qui ont mis en évidence les spinelles nickélicifères sur plusieurs sites d'impact.
10. E. Dransart, *Enquête sur l'hypothèse météoritique de la crise de la fin du crétacé*, L'Astronomie, 111, pp. 257-261, 1997.
11. R.A.F. Grieve, C.A. Wood, J.B. Garvin, G. McLaughlin and J.F. McHone, *Astronaut's guide to terrestrial impact craters* (NASA, 1988).
12. P. Hodge, *Meteorite craters and impact structures of the Earth* (Cambridge University Press, 1994). Un document mis au point par un grand spécialiste américain mais qui doit être actualisé régulièrement.
13. Dans *La Terre bombardée* de 1982, je signalais déjà que l'on était au tout début des découvertes dans ce domaine.
14. D. Storzer, W. Gentner and F. Steinbrunn, *Stopfenheim Kuppel, Ries Kessel and Steinheim basin : a triplet cratering event*, Earth and planetary science letters, 13, pp. 76-78, 1971.
15. P.J. Cannon, *Meteorite impact crater discovered in central Alaska with Landsat imagery*, Science, 196, pp. 1322-1323, 1977.
16. W. von Engelhardt, *Impact structures in Europe*, dans International Geological Congress, 24th session, section 15 : Planetology, pp. 90-111, 1972. Köfels est contesté comme cratère d'origine cosmique, mais les impactites et même l'iridium existent bel et bien et n'ont pas pu être formés par le seul glissement de terrain associé au cratère.
17. Th. Monod, *Astroblèmes et cratères météoritiques* (pp. 287-330) dans *Géologie*, tome I (La composition de la Terre) (Gallimard, 1972).
18. R. Gallant, *Bombarded Earth (an essay on the geological and biological effects of huge meteorite impacts)* (John Baker, 1964). Encore un pionnier quasiment oublié de nos jours, et c'est bien dommage.
19. B.S. Seylik and A.J. Seytmuratovwa, *Meteorites structures of Kazakhstan and impact-explosive tectonic*, Isvestia Akademii Nauk Kazakhstan SSR, 1, pp. 62-76, 1975. Il reste beaucoup à faire pour identifier plusieurs astroblèmes possibles sur l'immense territoire de l'ex-URSS.

20. C.S. Beals, M.J.S. Innes and J.A. Rottenberg, *Fossil meteorite craters* (pp. 235-284) dans *The Moon, meteorites and comets* (University of Chicago Press, 1963). Dans cet article, les trois auteurs envisageaient déjà une possible origine météoritique pour le golfe du Saint-Laurent, difficile à démontrer car l'astroblème a été totalement oblitéré par l'érosion et la sédimentation très importante de la région.
21. P.M. Bagnall, *The meteorite and tektite collector's handbook* (Willmann-Bell, 1991).
22. *East coast craters*, Sky and Telescope, p. 17, july 1996. C'est cette note qui a annoncé l'existence, longtemps insoupçonnée, d'un astroblème associé à Chesapeake Bay et l'existence d'un autre cratère maritime, situé 90 km plus à l'est, Tom's Canyon, qui a le même âge.
23. C.W. Hoag, *Chesapeake invader*, Princeton University Press, 1999. Ce livre, sous-titré *Discovering America's giant meteorite crater*, a été écrit par le géologue américain Wylie Poag qui a étudié en détail les causes et les implications de l'impact de la *Chesapeake Meteorite* comme l'appellent souvent les scientifiques américains.
24. J.G. Weihaupt, *The Wilkes Land anomaly : evidence for a possible hypervelocity impact crater*, Journal of Geophysical Research, 81, 32, pp. 5651-5663, 1976. L'article clé (contesté de nos jours) sur la reconnaissance du cratère fantôme de Wilkes Land.
25. I. Rézanov, *Les grands cataclysmes de l'histoire de la terre* (Mir, 1985).

CHAPITRE 12

LA MORT DES DINOSAURES

Quand on parle de la mort des dinosaures, il s'agit bien sûr d'un raccourci facile et un peu abusif. En fait, pour être plus précis, il convient de parler de la mort (de l'extinction plutôt) de l'ensemble des espèces disparues à la fin du Crétacé, dernière période de l'ère secondaire (ou mésozoïque), et encore plus précisément de son dernier étage géologique, le Maastrichtien qui s'est étendu de 72 à 65 MA. Mais, comme je le montrerai au chapitre 15 consacré aux extinctions, celle-ci fut loin d'être une extinction généralisée (il n'y en a eu aucune de ce type), mais elle fut extraordinairement *sélective*, anéantissant de nombreux ordres du monde animal et végétal, et un très grand nombre d'*espèces*.

L'extinction de la fin du Crétacé

L'un des principaux mystères de la paléontologie a longtemps été la disparition d'un grand nombre d'animaux terrestres et aquatiques à la fin de l'ère secondaire, il y a environ 65 MA (1/2). Parmi la biosphère du Crétacé supérieur, on connaît surtout les grands reptiles, que ce soient les dinosaures terrestres, les plésiosaures et mosasaures marins et les ptérosaures volants, dont on a retrouvé ou reconstitué les squelettes si caractéristiques et si spectaculaires. On sait que les espèces étaient nombreuses, implantées dans le monde entier, et pourtant aucune d'entre elles n'a pu franchir avec succès le cap de l'ère tertiaire.

L'extinction du Crétacé est considérée comme l'une des cinq extinctions de masse répertoriées (voir le chapitre 15). Elle a affecté environ 75 % des espèces vivantes. 45 % des espèces marines flottantes auraient disparu contre seulement 20 % des espèces vivant au fond des mers. Pour le domaine continental, 15 % des espèces d'eau douce et 20 % des espèces terrestres auraient disparu. Mais, en fait, la vie terrestre *dans sa globalité* n'a pas été vraiment menacée, malgré une période post-catastrophe particulièrement difficile à vivre.

Plusieurs générations de paléontologues ont tenté de percer ce mystère et ont proposé des hypothèses plausibles (3). Une seule chose semblait certaine à tous : un refroidissement sensible de notre planète s'était produit il y a 65 MA, mais à lui seul il ne pouvait expliquer la disparition de toutes les formes vivantes qui se sont éteintes dans un laps de temps très court à l'échelle géologique.

On a parlé également d'un assèchement important des zones continentales et de sécheresse conduisant à un manque de nourriture et à une autodestruction du biotope des dinosauriens. D'autres auteurs ont noté des signes très nets (?) de dégénérescence, peut-être en liaison avec leur cerveau, bien connu pour être minuscule en comparaison de leur masse gigantesque.

Enfin, certains ont spéculé que le déclin et la disparition de la faune de l'ère secondaire étaient liés à l'apparition des premiers mammifères, apparus environ cinq millions d'années (vers -70 MA) avant la date charnière qui sépare les deux ères géologiques concernées. Mais il faut bien admettre que ce problème de concurrence n'a jamais été prouvé et ne peut expliquer la soudaineté du phénomène.

Jusqu'en 1978, de nombreuses hypothèses plus ou moins plausibles restèrent en concurrence, parmi lesquelles, dans le domaine astronomique, celle de l'explosion d'une supernova proche ayant entraîné une irradiation sur la Terre, et celle de l'impact cosmique. Cette hypothèse fut proposée dès 1942 par le météoricien Harvey Nininger (1887-1986) (4), reprise en 1956 par le paléontologue Max de Laubenfels (1894-1960) (5), puis ensuite par plusieurs chercheurs de diverses disciplines. Le chimiste (et prix Nobel) Harold Urey (1893-1981) (6), notamment, fut un chaud partisan de cette éventualité, dans un cadre plus large, puisqu'il envisageait la corrélation probable entre des impacts d'origine cosmique (astéroïdes et comètes) et la fin des ères géologiques. Mais pour possible qu'elle fût (et même quasiment certaine, on le sait aujourd'hui), cette corrélation n'était étayée alors d'aucune preuve.

Le problème de l'iridium et l'hypothèse des Alvarez

En 1979, Luis Alvarez (1911-1988), prix Nobel de physique en 1968, et son fils géologue, Walter Alvarez proposèrent à nouveau cette hypothèse de l'impact cosmique, mais cette fois avec un argument scientifique tout à fait nouveau et extrêmement ingénieux. L'argument principal qui soutient leur hypothèse est la découverte dans plusieurs régions du globe de concentrations anormalement élevées en iridium (jusqu'à 450 fois la valeur normale) et en osmium (250 fois) dans la fine couche géologique de l'époque (composée principalement d'argile et mesurant quelques centimètres d'épaisseur), baptisée 29R (la 29^e période recensée depuis la période présente, durant laquelle le champ magnétique terrestre a eu une direction inverse "R" du champ actuel) et dont la durée a été évaluée à moins de 1 MA. Cette couche est aussi connue des spécialistes sous le nom de couche K/T (Crétacé-Tertiaire). Cet iridium et cet osmium excédentaires (7) sont très probablement d'origine extraterrestre et proviennent donc de l'astéroïde responsable de l'impact, mais comme nous le verrons, certains scientifiques croient encore à une possible origine terrestre.

Dans un article historique (8), cosigné avec deux chimistes nucléaires américains, Frank Asaro et Helen Michel, les deux Alvarez ont expliqué qu'un astéroïde d'une dizaine de kilomètres (c'est-à-dire un "très gros" astéroïde) aurait heurté la Terre, et qu'une quantité énorme de débris et de poussières aurait été projetée dans la stratosphère. Cette couche de poussières, rapidement distribuée dans toute l'atmosphère, aurait empêché les rayons solaires de parvenir au sol durant quelques années.

L'obscurité partielle, sinon totale, aurait interrompu le processus de photosynthèse qui, on le sait, libère de l'oxygène à partir du gaz carbonique contenu dans les plantes. Privée de lumière, cette végétation aurait disparu pour une très grande part, affamant évidemment tous les grands animaux et entraînant très rapidement leur extinction totale. Seuls, les petits animaux de moins de 25 kg, dont les premiers mammifères, auraient pu survivre en se nourrissant de racines et de graines, peut-être aussi de résidus organiques. L'élimination de leurs concurrents directs, les grands "reptiles" de la fin du secondaire, a certainement facilité le développement des primates rescapés en libérant des niches écologiques et ainsi accéléré leur montée au premier plan de la chaîne biologique. Sans cet important impact d'un corps cosmique, il y a 65 MA, la vie terrestre (faune et flore) ne serait sans doute pas identique de nos jours à celle que nous connaissons. Cette hypothèse des Alvarez que certains chercheurs des sciences de la Terre et de la vie croyaient pouvoir facilement discréditer a, au contraire, magnifiquement supporté l'épreuve du temps et s'impose aujourd'hui, tout au moins dans ses grandes lignes, comme incontournable.

D'autres variantes furent proposées au début des années 1980 pour expliquer cette disparition des dinosauriens. Celle due au géologue catastrophiste suisse Kenneth Hsü (9) mettait en cause l'impact d'une comète dans un océan. Cette collision aurait provoqué un réchauffement brutal de l'atmosphère fatal à la faune géante, tandis que la destruction du plancton (dûment constatée également) et des organismes marins serait due à l'empoisonnement du biotope aquatique par les gaz nocifs libérés par la comète, notamment du cyanure et du gaz carbonique.

Bientôt l'importance des recherches multidisciplinaires sur le sujet de la fin du Secondaire allait entraîner une multitude de résultats, parfois contradictoires. Mais il faut admettre que le problème de l'iridium excédentaire dans la couche K/T, imaginé (en physicien) par Luis Alvarez et étudié sur le terrain (en géologue) par son fils Walter, a été un détonateur extraordinaire, le point de départ d'une nouvelle façon de concevoir l'évolution. On a eu la preuve que *le cataclysmisme peut être un facteur essentiel de création et d'évolution*. Concept révolutionnaire qui a fait trembler plusieurs sciences sur leurs bases et qui a également permis la réhabilitation de celui de catastrophisme.

Une recherche multidisciplinaire sans précédent

Dès la publication des résultats indiquant de très fortes concentrations d'iridium et d'osmium (et d'autres éléments sidérophiles) dans la couche d'argile séparant le Crétacé du Tertiaire, de nombreux travaux furent entrepris par des chercheurs de diverses disciplines pour trouver de nouveaux indices probants et pour avoir ainsi confirmation de la catastrophe (10/11). Voici notamment les résultats suivants.

L'étude des fonds marins datant de cette époque permet d'obtenir un autre résultat surprenant et très intéressant. Les océanographes remarquèrent en effet l'effondrement de la proportion de carbonate de calcium dans la fine couche (trois millimètres seulement) incriminée. Cette substance qui représente environ 40 % en poids des sédiments situés au-dessus (donc plus jeunes) et au-dessous (plus anciens) de la zone frontière n'en représente plus que 2 % (soit vingt fois moins) dans celle-ci. On attribue cette remarquable propriété à la disparition en masse du plancton, habituellement très riche en exosquelettes, principalement constitués de calcium, qui en temps normal recouvre les fonds marins.

Autre détail important relevé par les océanographes : l'augmentation de près de dix degrés de la température des eaux de surface dans l'Atlantique sud. Ainsi donc, après une courte période de froid intense, lié à l'hiver d'impact, la Terre a subi une importante augmentation de la température de sa biosphère, probablement liée à un effet de serre dû à un excès important de gaz carbonique. Cet excédent s'explique de la manière suivante. Normalement, ce gaz carbonique est assimilé par les plantes marines photosynthétiques. L'extinction massive de celles-ci aurait débouché sur une quantité de gaz carbonique largement excédentaire, et ce gaz serait passé dans l'atmosphère contribuant à l'augmentation de l'effet de serre et de la température constatée.

Cette très importante augmentation de la température, qui aurait peut-être duré 50 000 ans, pourrait avoir été responsable de l'extinction d'espèces rescapées de l'impact et de l'hiver d'impact qui lui a succédé. Les conséquences à moyen et long terme du premier cataclysme ont donc probablement contribué elles aussi à l'extinction massive, mais dans un deuxième temps seulement.

Quelques chercheurs, notamment des climatologues, ont tablé sur un échauffement de l'atmosphère terrestre tel qu'il aurait entraîné une série de réactions chimiques, notamment une production anormale d'oxyde d'azote, qui en se condensant et en se précipitant aurait formé d'importantes pluies acides. Celles-ci auraient pu "lessiver" les continents, empoisonner certaines chaînes alimentaires et priver certains animaux de nourriture.

Ainsi tous les travaux multidisciplinaires ont confirmé le scénario de l'impact et des conséquences terrestres qui en ont découlé. L'extinction se produit bien en réalité sur plusieurs milliers d'années, et n'est pas instantanée. L'impact crée les conditions de l'extinction mais ne semble pas, *à lui seul*, capable d'éliminer la totalité des formes vivantes de la Terre. Nous verrons que certains ordres du monde animal ont supporté sans dommages la période post-impact pourtant difficile à vivre.

Quelques autres hypothèses improbables

Tout de suite après l'hypothèse de l'impact cosmique, plusieurs autres hypothèses concurrentes furent proposées. Nous allons en dire quelques

mots avant de parler plus en détail de l'hypothèse de l'impact (comète ou astéroïde, ou fragments de ceux-ci, on ne le sait pas encore avec précision) qui n'est pratiquement plus discutée aujourd'hui. Nous divisons ces hypothèses quasiment abandonnées (même si elles ont pu jouer parfois comme phénomène additionnel et secondaire), bien qu'elles conservent encore parfois quelques partisans irréductibles (souvent des chercheurs de l'ancienne génération) en deux grandes catégories : les hypothèses astronomiques et les hypothèses terrestres.

Les hypothèses astronomiques

– *Augmentation du rayonnement cosmique.* Certains chercheurs, notamment des astrophysiciens (12), ont tablé sur une extinction due seulement à une très importante augmentation du rayonnement cosmique, associée à une inversion géomagnétique : l'extinction aurait donc été la conséquence d'un impactisme particulière particulièrement virulent. Mais nous avons vu que si celui-ci est parfois responsable de *mutations* génétiques, il ne peut avoir causé une extinction de masse.

On soupçonne également le rayonnement cosmique d'avoir une influence sur la formation et l'importance de la couche d'ozone, qui protège en période normale la biosphère des ultraviolets dangereux du Soleil. Et il est bien évident que la disparition épisodique de cette couche d'ozone est en mesure d'entraîner dans un premier temps une catastrophe écologique majeure, et dans un deuxième temps la disparition d'espèces mal protégées. Ce scénario se produit fréquemment à l'échelle astronomique, mais en aucun cas, répétons-le, on ne peut parler d'extinction de masse. Comme nous le verrons, ces extinctions dues à l'impactisme particulière sont le "bruit de fond" des extinctions, phénomène permanent et normal de l'évolution.

– *L'explosion d'une supernova proche.* Cette hypothèse était privilégiée dans les années 1970 (13). On sait depuis longtemps que des supernovae explosent régulièrement dans notre Galaxie, même si elles restent rares à l'échelle humaine (la dernière remonte à 1604, à l'époque de Kepler). A priori, on ne peut s'empêcher de postuler qu'une étoile *voisine* (quelques dizaines d'années lumière) a explosé il y a 65 MA, libérant un tel volume de radiations que celles-ci auraient encore été très virulentes en atteignant la Terre.

Cette hypothèse est aujourd'hui abandonnée pour la raison suivante. Les astrophysiciens ont montré qu'une telle explosion n'aurait pas pu transférer la quantité d'iridium relevée dans la couche K/T. De plus, la proportion relative observée des deux isotopes différents d'iridium (Ir-191 et Ir-193) est tout à fait caractéristique de celle observée dans le Système solaire, ce qui ne serait pas le cas si on se trouvait en présence d'iridium exogène, c'est-à-dire formé à *l'extérieur* de notre Système solaire.

D'autre part, une autre insuffisance a été notée. En effet, au cours de la période d'implosion d'une étoile qui précède le phénomène supernova proprement dit, les noyaux des éléments lourds du centre de l'étoile

capturent des neutrons. Cette association entraîne donc la formation de nouvelles espèces atomiques, en particulier du plutonium 244 (Pu-244). Cet élément radioactif est éjecté dans l'espace et aurait dû se trouver piégé en quantité mesurable dans la couche K/T. Or aucune trace de plutonium ne fut repérée.

– *La traversée d'un nuage interstellaire.* Certains astronomes ont évidemment pensé à cette hypothèse classique qui privilégie un phénomène plus lent et qui se produit épisodiquement. Dans ce scénario, l'iridium surabondant et les autres éléments sidérophiles répertoriés, tous issus du nuage, se seraient déposés très lentement dans la couche K/T au fur et à mesure que le Système solaire (et la Terre) se serait enfoncé à travers le nuage cosmique. On table environ sur une période de 200 000 à 300 000 ans pour la durée d'une telle traversée, ce qui peut paraître bien long à ceux qui ne sont pas familiers des quantités astronomiques et ignorent que ces nuages interstellaires sont gigantesques et peuvent atteindre plusieurs centaines d'années-lumière. A noter dans l'hypothèse du nuage que la collision avec quelques blocs météoritiques plus gros que de simples poussières n'est nullement exclu, dans la mesure où l'on sait que l'accrétion est un phénomène normal, obligatoire même, dans un nuage de poussières dense. Ces poussières, dans un premier temps, s'agglutinent en grumeaux qui progressivement prennent de l'importance et peuvent fort bien percuter une planète de passage.

L'intérêt dans la version du nuage interstellaire est la sélection probable de certaines radiations cosmiques (14). Ainsi les radiations bleues du spectre solaire auraient été interceptées par les poussières cosmiques et le phytoplancton n'aurait pu effectuer sa photosynthèse. En effet, ces radiations bleues sont les seules à pénétrer l'eau des océans jusqu'à 200 mètres environ de profondeur. Le phytoplancton, élément essentiel dans la chaîne alimentaire de la vie sous-marine, aurait quasiment disparu entraînant avec lui la décimation de nombreux consommateurs qui dépendent de lui (ammonites, belemnites, zooplancton...).

Pour expliquer la mort des dinosaures dans cette hypothèse du nuage interstellaire, il faut alors envisager un dérèglement du métabolisme de la vitamine D, du fait de la quasi-disparition des radiations ultraviolettes (les UV), qui aurait débouché sur des troubles graves au niveau de l'ossification et de la formation de la coquille des œufs. Plusieurs paléontologues ont vu là une alternative crédible à l'impact cosmique et ont tenté de privilégier cette hypothèse gradualiste. Hypothèse crédible peut-être, mais ne répondant pas vraiment aux données d'observation.

Les hypothèses terrestres

– *La régression marine.* C'était l'autre hypothèse favorite des gradualistes (15) qui voyaient d'un très mauvais œil le retour des idées catastrophistes dans les sciences de la Terre. On sait que quelques millions d'années avant la période incriminée, à la fin du Campanien, il y a 72 MA, le niveau de la mer était maximal et que, par opposition, les terres émergées étaient nettement plus restreintes qu'aujourd'hui. Toute l'Europe (telle qu'on la connaît sous sa forme actuelle) était un énorme plateau continental immergé, à près de 200 mètres de profondeur. Ce plateau tombait ensuite d'un seul coup vers les fonds marins où la vie était quasiment inexistante. Durant tout le Maastrichtien (72-65 MA), dernier étage du Crétacé, il se produisit au contraire une régression marine continue et très importante, et cela pour des raisons (probablement astronomiques) encore inexpliquées. Les continents regagnèrent progressivement du terrain, ce qui entraîna une continentalisation de la vie et aussi une modification globale du climat, avec des étés plus chauds et des hivers plus froids. Cet important contraste de température aurait été fatal aux gros reptiles à sang froid, dénués d'un système de régulation thermique. Leur disparition, ainsi que celle des autres espèces décimées, serait due, dans l'hypothèse de la régression marine, à une incapacité de s'adapter à la nouvelle donne climatique. Cette hypothèse, qui paraît bien légère pour les catastrophistes, fut vite remplacée par une autre hypothèse terrestre beaucoup plus solide, l'hypothèse volcanique.

– *L'hypothèse volcanique et les trapps du Deccan.* En fait, le dilemme concernant la fin du Crétacé, dès le début des années 1980 se réduisit à une controverse : *impactisme* ou *volcanisme* (16), sachant que les deux sont très fréquents et peuvent causer l'un et l'autre de nombreux dégâts à l'échelle de la planète. On a parlé d'*hiver d'impact*, on pourrait également parler d'*hiver volcanique*.

Depuis longtemps, les géologues connaissent les *trapps* (mot néerlandais qui signifie "escaliers"), ces vastes coulées basaltiques qui recouvrent certaines parties du globe et qui sont associées aux "points chauds", c'est-à-dire à l'origine de ces coulées. Les trapps du Deccan, en Inde, sont particulièrement impressionnants et spectaculaires, et justement ils sont contemporains de la fin du Crétacé. Les diverses coulées qui se sont succédé, et dont le volume a pu dépasser deux millions de kilomètres cubes, ce qui est tout à fait considérable, ont été datées avec précision à 65 MA (± 2 MA) et chevauchent donc très précisément la couche K/T qui indique avec précision la fin du Secondaire. Elles ont commencé *avant* l'impact, elles se sont terminées *après* l'impact. Les deux phénomènes ont été concomitants (17).

Cette coïncidence, plus que troublante, fut exploitée par les géologues, mais il n'en demeure pas moins que les interrogations n'obtinrent pas de réponse vraiment satisfaisante. Ces éruptions, même très violentes, pouvaient-elles expliquer les fameux pics d'iridium disséminés dans le monde entier ? Apparemment, la réponse est *non*. Pour ce qui est des extinctions, il est

certain que cet événement terrestre a pu jouer comme phénomène additionnel. En effet, les chercheurs firent remarquer que l'événement volcanique du Deccan avait duré au moins 500 000 ans, ce qui était très largement suffisant pour créer des conditions défavorables pour la survie de certaines espèces. Cette affirmation paraît fondée, mais il semble exclu que le volcanisme de cet époque ait pu être *la cause* de l'extinction de masse.

Les géophysiciens pour expliquer les raisons de ce volcanisme firent remarquer que la période incriminée suivait une très longue période durant laquelle le champ magnétique terrestre ne s'était pas inversé. Ils précisèrent que cette étonnante et inhabituelle stabilité pouvait s'expliquer par un ralentissement exceptionnel des mouvements internes qui agitent le noyau terrestre. Ce ralentissement déboucherait sur une instabilité du manteau, et par suite sur une anomalie de température se traduisant au niveau de la croûte terrestre par un volcanisme d'une intensité inhabituelle, avec les conséquences écologiques et biologiques qui obligatoirement en découlent. Cette brillante hypothèse (mais pas forcément vraie ponctuellement) paraissait confortée par la formidable mutation que subissait la tectonique des plaques à cette période, et par le fait qu'à la même époque (-65 MA), l'Inde, véritable sous-continent, détachée du supercontinent qu'était le Gondwana, se dirigeait vers l'Asie et se trouvait à l'aplomb d'un point chaud, celui de la Réunion, qui est associé aux trapps du Deccan.

Les émissions d'anhydride carbonique dans les couches supérieures de l'atmosphère auraient emprisonné la chaleur (effet de serre), l'élévation de la température étant suffisante pour stopper le processus de reproduction des grands reptiles, sans que les animaux de petite taille soient véritablement affectés par le phénomène. L'iridium, dont il faut impérativement expliquer la provenance, serait totalement terrestre et serait issu d'une couche beaucoup plus profonde que celle des volcans ordinaires. Il trouverait son origine dans les racines profondes des panaches qui prennent naissance à la limite du manteau et du noyau terrestre. Sa remontée vers la surface aurait ensuite eu lieu par les conduits volcaniques ordinaires et il aurait été expulsé en même temps que les cendres volcaniques classiques. Sa diffusion dans la couche K/T aurait bien été progressive et aurait eu le caractère habituel des événements volcaniques. Seule la substance même (l'iridium) différerait dans la mesure où son origine, beaucoup plus profonde, est différente et exceptionnelle. Seule une anomalie temporaire du mouvement du noyau terrestre pourrait engendrer un tel phénomène.

L'hypothèse volcanique qui a eu, et qui a encore, des partisans convaincus, comme le physicien Vincent Courtillot (18) en France, a progressivement perdu du terrain, en ce qui concerne tout du moins sa responsabilité dans l'extinction massive de l'époque. Comme je l'ai dit, en effet, cette remarquable catastrophe volcanique a démarré avant l'impact. Les trapps du Deccan ont été divisés en huit couches différentes. D'après les recherches faites dans les années 1990, des traces de l'impact auraient été repérées dans la *troisième* couche.

L'impact cosmique : la recherche des preuves

A la fin des années 1980, les géologues et les géophysiciens se sont, dans leur grande majorité, ralliés, par la force des arguments développés et incontestables (excédent d'iridium et autres éléments sidérophiles, existence de quartz choqués et de spinelles nickélifères notamment), à la thèse de l'impact cosmique pour expliquer la fin du Crétacé. Cette chasse aux preuves a été une véritable saga scientifique, comme on n'en avait peut-être jamais connu auparavant. Je vais raconter les principales découvertes qui ont permis à la communauté scientifique dans son ensemble de comprendre et d'admettre (ce qui n'était pas évident pour beaucoup) le bien-fondé de cette démarche multidisciplinaire.

J'ai parlé dans le chapitre consacré aux astroblèmes de leur formation et des sous-produits de l'impact comme les tectites et les minéraux *choqués*. Il était donc logique que les chercheurs essaient de les retrouver dans les sédiments de la couche K/T et de déterminer le fameux "point zéro", à partir duquel la diffusion se serait faite. C'est le géologue américain Bruce Bohor (19) qui annonça le premier la découverte de nombreux grains de quartz choqués dans une couche K/T du Montana, ainsi que des microsphérules de feldspath ayant incontestablement subi des déformations dues à des surpressions très importantes puisque de l'ordre de 100 gigapascals (soit 1 million d'atmosphères).

A partir de cet instant, de nombreuses découvertes similaires furent signalées, étonnamment éparpillées dans le monde entier, sur tous les grands lieux de la couche K/T, mais aussi en Russie. Ainsi donc, la distribution des résidus de l'impact semblait avoir été planétaire. Ce qui ne simplifiait pas la découverte du "point zéro". Si le quartz était le minéral le plus abondant, d'autres comme le feldspath et le zircon présentaient également des traces indéniables de déformation dues à des hautes pressions.

La première leçon de cette découverte importante était que l'impact avait été probablement *continental* et non maritime, comme on le croyait d'une manière préférentielle pour une triple raison. D'abord parce qu'on avait pas retrouvé l'astroblème responsable, malgré d'incessantes recherches, ensuite pour des raisons statistiques évidentes : l'impact avait 7 chances sur 10 d'avoir eu lieu en mer, et enfin parce qu'un impact maritime expliquait nettement mieux certaines extinctions consécutives principalement à un empoisonnement des eaux océaniques. En effet, le quartz est presque toujours absent des basaltes océaniques, alors qu'il est très fréquent dans les roches continentales.

Une autre découverte importante fut l'existence d'une poussière de diamants dans la couche K/T. Ces microdiamants, observables au microscope

électronique, ne dépassaient pas 5 à 6 nanomètres de diamètre mais prouvaient, outre bien sûr la haute pression indispensable pour les former, la présence de *carbone* en grande quantité sur le site d'impact.

Une nouvelle preuve fut trouvée avec la découverte de *spinelles* (une famille d'oxydes métalliques) dans la couche K/T. Contrairement aux spinelles habituels, qui sont très fréquents sur Terre, ceux de la couche K/T sont *oxydés* et se distinguent par une haute teneur en nickel et en magnésium. Ils ont subi ce qu'on appelle l'ablation aérodynamique, dont nous avons parlé pour les météorites et les tectites. Ils ont donc été formés dans l'atmosphère avant l'impact, et ont subi leur oxydation à une altitude inférieure à 20 km, avant de se répartir un peu partout au gré des courants atmosphériques probablement très perturbés durant la période post-impact et se sont retrouvés piégés dans de nombreux sites encore identifiables de nos jours, 65 MA plus tard.

Enfin, dans les couches K/T, extraordinairement intéressantes et prolifiques pour ceux qui savent les "faire parler", on signala également la présence d'*acides aminés* d'origine extraterrestre (20), ce qui renforça encore la quasi-certitude des chercheurs sur la réalité de l'origine cosmique de l'extinction liée à ces couches. Ce furent d'abord deux biochimistes américains, Meixun Zhao et Jeffrey Bada, qui en étudiant la fameuse couche K/T de Stevns Klint, au Danemark, découvrirent dans des sédiments plusieurs acides aminés, en quantité infime mais mesurable. Deux d'entre eux s'avérèrent être d'origine extraterrestre puisque quasiment inexistant dans la matière organique terrestre. Cette découverte remarquable fut rapidement confirmée et amplifiée sur d'autres sites K/T, tant et si bien que plus de 50 acides aminés différents furent répertoriés, dont une vingtaine qui n'existent pas sur Terre et qui sont donc obligatoirement d'origine extraterrestre (21).

La recherche du cratère

Pour les géologues qui ne doutaient plus de l'impact, la question principale était de trouver le cratère associé. Ils se posèrent évidemment la question : fait-il partie de la grosse centaine d'astroblèmes repérés sur la Terre et dont beaucoup restent non datés, ou reste-t-il à découvrir ? Nous avons dit que l'hypothèse continentale pour le cratère était privilégiée depuis la découverte de carbone dans les couches K/T. Plus précisément, divers indices laissaient supposer un impact sur la croûte continentale de l'Amérique du Nord où les quartz choqués sont les plus nombreux.

Un gros effort fut donc entrepris pour la datation précise des quelques grands astroblèmes pouvant éventuellement convenir par leur taille et par leur âge. Plusieurs cratères furent successivement proposés (Manson dans l'Iowa, Kara en Russie et Popigai en Sibérie notamment), mais leur âge supposé ne correspondait pas aux sacro-saints 65 MA obligatoires.

Les diverses simulations, notamment celles d'Eugene Shoemaker (1928-1997), le géologue-astronome américain, laissaient supposer un cratère au

moins égal à 150 km si l'astéroïde supposé avait 10 km de diamètre au moment de l'impact, valeur considérée comme minimale pour justifier la formidable quantité d'iridium dispersé tout autour du monde. Le fait même qu'un astéroïde de 150 km relativement récent à l'échelle astronomique, surtout si on le compare aux deux vieux astéroïdes de Sudbury et de Vredefort encore discernables bien que 27 fois plus anciens, obligeait à penser que des processus très importants et très efficaces de sédimentation et d'érosion devaient jouer pour entraîner la dissimulation rapide d'une structure géante.

Nous allons voir maintenant les étapes essentielles qui ont mené à la découverte du cratère.

En 1985, le géologue néerlandais Jan Smit, catastrophiste convaincu et très efficace, attira l'attention sur l'existence d'une couche exceptionnelle de grès grossiers, de galets argileux et de nodules de carbonates recouverts de grains plus fins. Ce type de sédiments aurait été déposé très rapidement à la limite d'un affleurement K/T sur un site de Brazos River, dans l'Etat du Texas, proche du golfe du Mexique (22). Il l'attribua avec beaucoup d'à-propos et de perspicacité à l'action d'un tsunami géant lié à l'impact. La suite allait lui donner raison. Des études complémentaires menées sur ce site par la géologue américaine Joanne Bourgeois et son équipe (23) confirmèrent le bien-fondé de l'idée de Smit. L'équipe américaine décrivit cinq affleurements K/T sur le site de Brazos River et annonça qu'un tsunami d'impact avait bien eu lieu, et compte tenu de l'amplitude de 100 mètres relevée sur le site étudié, elle annonça que le lieu d'impact était distant de moins de 5000 km et devait être recherché depuis les côtes du golfe du Mexique jusque dans l'Atlantique. Etant donné que l'impact terrestre était privilégié, les côtes du golfe du Mexique devaient pouvoir fournir la solution tant recherchée.

La confirmation du tsunami d'impact fut apportée en 1986 par la découverte d'une nouvelle couche de grès à la limite K/T, à Cuba cette fois. A Haïti, c'est le jeune géologue canadien Alan Hildebrand, à la recherche du cratère, qui découvrit avec son directeur de thèse, le planétologue américain William Boynton, des éjectas d'impact sur la côte sud de l'île, indéniablement liés à l'impact et répartis sur un demi-mètre d'épaisseur (24). Hildebrand identifia parmi eux des *microtectites* atteignant jusqu'à 1 cm de diamètre, preuve formelle d'un impact. Compte tenu de l'épaisseur des dépôts, le cratère source n'était plus distant que de 1000 km au maximum.

Il faut savoir qu'à la fin du Crétacé, la géographie de l'Amérique du Nord et de l'Amérique centrale différait sensiblement de ce qu'elle est actuellement. Les côtes actuelles étaient noyées par le niveau des eaux, qui quoique en diminution, nous l'avons vu quand nous avons parlé de l'hypothèse de la régression marine, était encore supérieur au niveau actuel. De plus, elles ne se trouvaient pas exactement à leur emplacement actuel, la tectonique des plaques (via notamment la plaque Caraïbes) ayant joué depuis son office.

Hildebrand et Boynton firent une recherche, d'abord cartographique, des différentes structures de la région, dans un rayon de 1000 km autour de l'ancienne position d'Haïti, qui pourraient correspondre au cratère attendu. Ils en retinrent deux, d'abord une grande structure de 300 km au large de la Colombie et enfouie sous 2 km de sédiments qui n'allait donner aucun résultat positif et qui fut donc abandonnée. Ensuite une structure de 200 km au nord du Yucatan, un peu en dehors de leur champ d'étude initial, mais qui avait été déjà étudiée en vue d'une possible utilisation pétrolière et sur laquelle on possédait quelques informations. Cela allait être le fameux "point zéro" cherché depuis une bonne dizaine d'années par tous les géologues qui étudiaient la fin du Crétacé.

Ce "point zéro" c'est l'astroblème de Chicxulub.

Chicxulub : le cratère invisible mais bien réel

Il faut savoir que cette structure de Chicxulub était déjà connue depuis une quarantaine d'années de la communauté pétrolière, puisqu'elle fut le lieu de carottages océaniques et terrestres, destinés à trouver des réserves de pétrole exploitables, à partir du début des années 1950. Les études gravimétriques et magnétiques de l'époque avaient révélé des anomalies et une structure *annulaire* centrée près de Mérida sur la côte nord du Yucatan. Les carottages ayant remonté des débris cristallins et vitreux, ressemblant à des andésites volcaniques, les géologues classèrent (un peu vite) la formation comme étant une ancienne caldéra volcanique, sans intérêt pour la communauté pétrolière.

Une nouvelle campagne d'investigations pétrolières fut entreprise en 1978 par la Pemex (société pétrolière nationale mexicaine), à laquelle participait le géologue américain Glen Penfield. Celui-ci comprit que la structure annulaire était en fait un *astroblème de 180 km* présentant une importante anomalie magnétique centrale. Avec le géologue mexicain Antonio Camargo, qui confirma totalement son hypothèse, ils tentèrent de faire reconnaître leur découverte. Ils firent à ce sujet une communication en octobre 1981 qui, de manière incompréhensible, ne sortit pas de la communauté pétrolière (25) et n'eut aucune répercussion.

Nous avons vu précédemment que, dans les années 1980, de nombreux chercheurs se démenèrent pour trouver des preuves et le lieu de l'impact. Si le travail de Penfield et Camargo avait été diffusé comme il aurait dû l'être, la communauté scientifique aurait probablement gagné plusieurs années dans la solution du problème de la fin du Crétacé. Mais les choses avançaient quand même.

En 1990, Hildebrand put étudier des échantillons d'un forage effectué sur le site du Yucatan à une profondeur de 1200 à 1300 mètres, échantillons qui s'avérèrent contenir des grains de quartz choqués atteignant 1 cm, preuve d'un impact important. En réunissant toutes les informations existantes et concordantes dont il put disposer, notamment grâce à l'appui de Penfield et

Camargo, Hildebrand annonça l'existence probable d'un cratère d'impact de 180 km de diamètre, enfoui sous plus de 1 km de sédiments et centré sur la ville côtière de Chicxulub, plutôt que sur celle de Mérida située 15 km plus à l'ouest. En surface, le contour du cratère peut être cerné grâce à des points d'eau, connus localement sous le nom de *cenotes*, répartis tout autour de la structure d'impact et qui sont l'exutoire de failles souterraines.

La publication de son article, cosigné avec six autres chercheurs (26), fit l'effet d'une bombe dans les milieux scientifiques. Très rapidement, la structure fut confirmée par des images satellite, car évidemment elle n'est pas visible du sol, s'avérant du même coup l'un des plus grands astroblèmes probables recensés (27).

Il restait à la dater avec précision, bien que tous les autres éléments déjà connus associés au cratère, et dont nous avons parlé plus haut, postulaient bien sûr pour un âge identique de 65 MA. Un réexamen de tous les quartz choqués et des laves d'impact des environs du cratère donnèrent à Chicxulub un âge de $64,98 \pm 0,05$ MA, étonnamment proche de la valeur retenue pour les divers dépôts d'iridium et autres éléments de la couche K/T, mais aussi pour celle obtenue pour les éjectas d'Haïti, pour lesquels la datation par la méthode argon/argon donna exactement $65,01 \pm 0,08$ MA. Les deux valeurs quasiment identiques prouvaient définitivement *l'unicité* de la catastrophe et le *lien génétique* entre le cratère et les quartz choqués retrouvés un peu partout dans les couches K/T du monde entier.

C'était vraiment une belle victoire pour tous ceux qui pendant plus de dix ans se battirent pour prouver la réalité de l'hypothèse suggérée par les Alvarez en 1978, même si certains tentèrent un ultime combat d'arrière-garde en niant l'évidence et en soutenant encore que Chicxulub n'est rien d'autre qu'une caldéra volcanique (28).

Depuis sa reconnaissance définitive, la structure de Chicxulub a fait l'objet de nombreuses recherches complémentaires. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cet astroblème est remarquablement conservé, parce qu'il n'a pas subi les classiques effets de l'érosion, très sensibles en règle générale en quelques millions d'années. Chicxulub, au contraire, du fait que l'impact a eu lieu sur une plate-forme continentale *immergée*, fut très rapidement enfoui sous une chape de sédiments calcaires côtiers de plus de 1000 mètres d'épaisseur, sédiments qui l'enterrèrent et le protégèrent ainsi d'une destruction inévitable. Le revers de la médaille, on s'en doute, est sa quasi-invisibilité qui explique d'ailleurs fort bien qu'il ait fallu tant d'années pour le mettre en évidence d'une façon certaine.

Chicxulub est un cratère d'impact de 180 km, mi-terrestre, mi-océanique centré sur la position $21,27^{\circ}\text{N}$ et $89,60^{\circ}\text{W}$. Sa projection en surface est scindée en deux par la ligne des côtes du nord Yucatan. La moitié sud est terrestre et partiellement cachée sous des marécages, des broussailles et de multiples plantations de cactus, tandis que la partie nord s'étend sur le

plateau continental dans une eau peu profonde et cachée par les sédiments du golfe du Mexique.

Certains géologues ont postulé pour un diamètre supérieur pour le cratère. On a évoqué 240 km ou même 280 km, mais ces résultats ne furent pas retenus par la communauté scientifique, car ils ne prenaient pas en compte la totalité des données existantes : résultats des forages, relevés magnétiques et gravimétriques, profils sismiques, volume calculé des divers éjectas et diamètre supposé (10 km) de l'objet responsable de l'impact.

Pour terminer le récit de cette longue chasse au cratère, il convient de retenir surtout le nom du géologue canadien Alan Hildebrand, jeune thésard au début de ses recherches, qui ne renonça jamais quand il sut qu'il était dans le vrai, et à qui de nombreux mandarins américains, jaloux de sa réussite, mirent des bâtons dans les roues. Mais, on le sait, la vérité finit toujours par triompher, même s'il lui faut du temps parfois.

L'impact cosmique

Après avoir longuement parlé de la chasse au cratère et du cratère lui-même, il nous faut revenir maintenant à la catastrophe, à l'impact cosmique.

Que savons-nous de l'impacteur, qui pouvait être un astéroïde ou une comète ou même un objet mixte mi-astéroïde/mi-comète ? Son diamètre estimé par les Alvarez à 10 km est tout à fait crédible. Rappelons qu'il avait été envisagé en fonction du volume d'iridium contenu dans les diverses couches K/T. Il contenait de nombreux éléments sidérophiles, notamment de l'iridium et de l'osmium. Il contenait aussi des acides aminés, c'est-à-dire de la matière prébiotique. Ces indices ne sont pas suffisants pour trancher entre les trois alternatives possibles : comète, astéroïde, objet mixte, même si certains scientifiques se sont cru en mesure de trancher pour la première ou la deuxième.

L'énergie d'un impact est égale au demi-produit de la masse de l'impacteur par la carré de la vitesse d'impact ($E_c = 1/2 mv^2$) et elle est donc un paramètre très important. On connaît la masse approximative du bolide cosmique estimée très grossièrement à 1000 milliards de tonnes. La vitesse, elle, est indéterminée puisqu'elle a pu avoir toutes les valeurs possibles entre 10 et 72 km/s selon les éléments orbitaux et la géométrie de l'approche. On table sur une valeur moyenne de 20 km/s qui, dans le cas présent, est une assez grossière approximation. En tenant compte d'une densité moyenne, on peut retenir une énergie d'impact de l'ordre de $10^{23}/10^{24}$ joules. C'est grosso modo de 10 à 100 millions de mégatonnes de TNT, soit de 1000 à 10 000 fois l'énergie dégagée par l'arsenal nucléaire de l'humanité. Si la vitesse était supérieure, ce qui est tout à fait possible, l'énergie d'impact a pu dépasser 10^{24} joules. Ces chiffres parlent peu en fait, mais il faut se rappeler que le plus important séisme connu, celui du Chili en 1960, a libéré une énergie de 10^{20} joules, 10 000 fois inférieure, et de plus comme je l'ai expliqué, l'énergie à l'occasion d'un impact est libérée en quelques secondes seulement. On

peut donc l'affirmer : l'impact d'un objet de 10 km sur la Terre est un cataclysme de première grandeur, heureusement rarissime puisqu'il s'en produit un en gros tous les 100 millions d'années.

De multiples simulations, effectuées par des chercheurs de diverses disciplines, ont tenté de faire comprendre avec un maximum de précisions les conséquences de l'impact. Bien qu'elles diffèrent quelque peu selon le modèle théorique utilisé, on a obtenu pour les différentes phases de la catastrophe des ordres de grandeur assez convergents.

Ainsi on a constaté que l'objet cosmique n'était quasiment pas freiné durant sa traversée de l'atmosphère et que la troposphère a été traversée en moins d'une seconde, temps si court que la sublimation due à l'échauffement a juste concerné une fine couche à l'avant du corps cosmique et que l'arrière de celui-ci a été peu affecté. Par contre, l'atmosphère a été littéralement soufflée autour du corps céleste, emportant avec elle environ 0,1 % de l'énergie cinétique, soit de 10^{20} à 10^{21} joules selon l'énergie retenue. Le corps cosmique a été totalement volatilisé lors de l'impact, pulvérisant la croûte terrestre tout autour du "point zéro", l'énergie cinétique considérable se transformant en partie en énergie thermique. On estime que 98 ou 99 % de l'énergie ont été utilisés pour la fonte et la volatilisation de l'impacteur et de la roche cible, l'éjection des débris et aussi l'impressionnant ébranlement sismique, les 1 ou 2 % restants (ce qui représente encore de 10^{21} à 10^{22} joules) étant disponibles pour l'ouragan et le raz-de-marée.

L'impact, on s'en doute, fut fulgurant et terrible, libérant *en moins de dix secondes* une énergie supérieure à 1000 ans d'activité sismique. Comme l'impact a eu lieu sur un *plateau continental immergé*, les 100 ou 200 mètres d'eau ont été soufflés quasi instantanément. La matière du cratère, formé en moins d'une minute (période de compression + période de relâchement), mélangée à celle de l'objet cosmique, ce qui représente une colossale quantité de débris divers et choqués, a été projetée dans l'atmosphère.

On table aujourd'hui pour un *impact oblique*. Le bolide venait du sud-est (il survola l'Amérique du Sud avant l'impact) et se dirigeait vers le nord-ouest. L'astroblème a conservé les traces d'un tel impact avec un angle incident assez prononcé et son empreinte gravimétrique est restée asymétrique. Du coup, les diverses projections de matériel ont été maximales en Amérique du Nord, où l'on sait que les extinctions ont été plus nombreuses qu'ailleurs, et aussi dans l'Atlantique nord.

La période post-catastrophe

On entra tout de suite dans la période post-impact avec une Terre totalement meurtrie. Une fantastique onde de choc rayonna à la fois dans l'atmosphère, dans l'océan et sur les continents.

Sur la mer, ce fut un gigantesque raz-de-marée dont certaines traces sont encore décelables 65 MA plus tard (le fameux tsunami d'impact dont nous

avons parlé). Sur la Terre, des séismes atteignirent jusqu'à la magnitude 13 sur l'échelle de Richter (1 million de fois supérieure à une "classique" magnitude 7) et eurent des répercussions jusqu'aux antipodes du point d'impact situé dans l'océan Indien (ce point est appelé le "point zéro bis"). Dans l'atmosphère, l'ouragan démarra avec une vitesse proche de celle de la vitesse d'impact (entre 10 et 72 km/s) qui diminua progressivement au fil des minutes, tandis que l'onde de choc se heurtait à une masse d'air de section croissante. Les modèles montrent que l'onde de choc avait parcouru plus de 500 km en 10 minutes seulement.

Tout de suite après l'impact et avec le déploiement de l'onde de choc, la température de l'atmosphère a grimpé d'une manière phénoménale, certains chercheurs ont même parlé de "rôtissoire". Dès cet instant, une grande majorité d'animaux ont été tués quasiment sur le coup, avant même de pouvoir se mettre à l'abri. Comme l'a remarquablement découvert la chimiste américaine Wendy Wolbach (29), l'effet "rôtissoire" est certainement dû en grande partie à un embrasement général de la végétation sur une partie importante de la surface terrestre, notamment en Amérique du Nord. Elle a en effet relevé dans la couche K/T une impressionnante quantité de carbone de combustion (jusqu'à 10 000 fois supérieure à la normale). Elle en a conclu que près de la moitié de la biomasse terrestre avait brûlé durant les premiers mois de la période post-impact. Cette catastrophe écologique, comme il s'en produit peut-être tous les 10 MA, entraîna une véritable hécatombe dans le monde vivant.

Progressivement (en quelques années probablement), cette chaleur insupportable diminua, pour laisser place dans un deuxième temps à une température glaciale, en liaison avec la fameuse "nuit" produite par la diffusion tout autour de la planète d'un véritable écran de poussières et de suie qui dura, lui aussi, quelques années ou même dizaines d'années. La chaleur du Soleil ne pouvant plus parvenir au sol, c'est toute la végétation restante qui fut soumise à l'hiver d'impact, et avec sa disparition les diverses chaînes alimentaires nécessaires à la survie d'espèces rescapées. Combien d'animaux survivants de la période précédente périrent alors ? A coup sûr, un très grand nombre au niveau des individus furent éliminés mais, comme nous le verrons dans la section suivante, ce ne fut pas la même chose au niveau des espèces et des niveaux supérieurs du monde animal. En tout cas, quelles que furent les conditions de vie (bien difficiles sans doute) durant cette période post-impact, certains êtres vivants parvinrent à survivre, protégés sans doute par des conditions climatiques régionales ou locales un peu moins ingrates, et aussi par des particularismes physiologiques favorables (tortues notamment).

Dans un troisième temps, beaucoup plus long, puisqu'on l'estime à 50 000 ans, la Terre fut soumise à nouveau à un important accroissement de la température de l'atmosphère (et de la biosphère) attribué, lui, à l'effet de serre bien connu aujourd'hui, créé principalement par un excès de gaz carbonique. Celui-ci, normalement assimilé par la végétation terrestre et par

les plantes marines photosynthétiques, fut transféré directement à l'atmosphère du fait de la disparition de ses "consommateurs" habituels.

Pour résumer, la période post-impact eut trois phases principales bien distinctes :

1. Une courte période (quelques années) de chaleur intense, parfois supérieure même à 100° sur certains sites proches de l'impact et dans les régions où la végétation fut soumise à un incendie auto-perpétuant qui gagna progressivement des régions primitivement épargnées.
2. Un hiver sibérien pour toute la planète privée de l'indispensable chaleur solaire qui dura quelques années ou dizaines d'années et durant laquelle une partie de la faune rescapée disparut faute de nourriture.
3. Une augmentation progressive de la chaleur due à l'effet de serre, consécutif lui à un important excès de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cette période fut beaucoup plus longue que les deux précédentes et dura peut-être 50 000 ans.

Cet enchaînement du chaud, du froid et du chaud à nouveau, fut la cause de l'élimination d'innombrables individus qui avaient survécu à l'impact proprement dit.

Le concept d'hiver d'impact, popularisé par le drame de la fin du Secondaire, a donné des idées aux scientifiques qui l'ont adapté ensuite à *l'hiver nucléaire*, qui en est une variante, un cataclysme causé par l'homme lui-même et non pas un phénomène somme toute naturel.

L'extinction des dinosaures

Il nous faut revenir à *l'extinction de masse* qui fut la conséquence majeure de la collision cosmique et des conditions de vie calamiteuses dans la biosphère durant la période post-impact. Nous venons de voir que ses trois phases entraînèrent successivement une décimation très importante au niveau des individus, mais très sélective au niveau des espèces et des ordres du monde animal (et végétal).

Les paléontologues pensent en général que la majorité des gros animaux fut décimée durant les deux premières phases. L'intense chaleur de la première, suivie du froid polaire de la seconde et surtout la disparition des diverses chaînes alimentaires furent probablement suffisantes pour éliminer les dinosaures. Ces paléontologues ont signalé une étonnante *sélectivité* de l'extinction de masse Crétacé-Tertiaire pour les neuf ordres de reptiles existant en Amérique du Nord à la fin du Secondaire. Parmi ceux-ci, les gros animaux, dinosaures, ptérosaures, ichthyosaures et plésiosaures, soit quatre ordres divisés en vingt et une familles au total, furent exterminés à 100 %. Par contre, les huit familles de tortues, apparemment beaucoup plus aptes à faire face aux conditions draconiennes de l'environnement, et donc mieux

armées pour la survie, passèrent sans dommages (au niveau des familles et non des individus bien sûr) la période difficile. Les deux ordres de serpents sortirent également indemnes. Pour les lézards et les crocodiliens, l'extinction fut seulement partielle, puisque 75 % des familles faisaient encore partie du monde vivant durant le Tertiaire. Globalement, en ce qui concerne les reptiles, l'extinction fut de 55 %.

Comme l'ont fort bien expliqué Stephen Jay Gould (30) et David Raup (31), entre autres, seule la *malchance* a éliminé les dinosaures et leurs semblables. Et pourtant, ils dominaient depuis plus de 100 MA le monde vivant. On a même postulé que le *sténonychosaure*, découvert au Canada en 1967, possédait des facultés étonnantes et que son cerveau était anormalement développé. D'autres petits dinosaures bipèdes carnivores évoluaient d'une manière très favorable vers l'intelligence.

Quelques paléontologues ont remarqué, avec humour, qu'il s'en est fallu de peu (à un impact cosmique et une catastrophe écologique près) que le successeur du *sténonychosaure* soit le maître de la Terre, à notre place. On ne pourra plus jamais prétendre que l'impactisme et le catastrophisme qui lui est associé n'ont pas de conséquence sur l'évolution, qui a sans aucun doute un caractère *aléatoire* et donc *imprévisible* à long terme. *Le cataclysmes est bien une force de destruction et de création.*

Une véritable révolution épistémologique

L'explication nouvelle sur la mort des dinosaures et de nombreuses autres espèces à la fin de l'ère secondaire a été une révolution scientifique. Mais il faut rappeler pour terminer ce chapitre, et aussi la partie " *Preuves* " de ce livre, qu'elle a été beaucoup plus que cela : une authentique révolution épistémologique.

Certains commentateurs ont parlé de "guerre ouverte", dans les années 1980, entre les catastrophistes et les gradualistes, guerre qui s'est terminée par la déroute des seconds. Il faut bien comprendre que quasiment tous les mandarins de la géologie et de la paléontologie qui furent confrontés au "problème de l'iridium" étaient des hommes (très rarement des femmes) formés dans les années 1950-1960, à une époque où l'impactisme et le catastrophisme étaient totalement bannis de l'enseignement supérieur. A eux aussi, donc, le ciel est (intellectuellement) tombé sur la tête, quand il leur fallut admettre (certains ne s'y firent jamais) que le cataclysmes devait être introduit comme un élément majeur et incontournable de l'histoire de la Terre et de celle de la vie.

Ce sont surtout de jeunes chercheurs (Hildebrand est emblématique à ce propos, mais il y en a eu de nombreux autres qui travaillèrent dans l'ombre), les élèves de ces mandarins, qui démontrèrent le bien-fondé des idées catastrophistes en allant chercher et trouver sur le terrain les preuves nécessaires, alors que les anciens, d'abord incrédules, étaient de plus en plus inquiets au fur et à mesure qu'ils sentaient le savoir, leur raison d'être

souvent, leur échapper. C'est presque toute une génération de savants qui fut traumatisée et parfois ringardisée en une seule décennie (les "néfastes" années 1980), sans possibilité souvent de s'adapter à la nouvelle donne scientifique, mais aussi à l'évolution des nouvelles techniques d'observation et de datation.

La plupart d'entre eux campèrent sur des positions dépassées, s'appuyant contre toute logique sur des hypothèses insuffisantes, comme les régressions marines ou le volcanisme intensif. Il est sûr que de tels cataclysmes ont joué à certaines périodes de l'histoire de la Terre et ont été la cause d'extinctions secondaires ou mineures (voir le chapitre 15 consacré aux extinctions et à l'évolution). Il n'empêche qu'ils ne peuvent expliquer d'une manière satisfaisante les grandes extinctions majeures, dites de masse, qui ont été presque obligatoirement engendrées par des cataclysmes d'origine cosmique, comme le pensait déjà Harold Urey à la fin des années 1960.

Beaucoup de ces mandarins de la géologie et de la paléontologie en voulurent à Luis Alvarez (un physicien, arrogant de nature, totalement extérieur à ces spécialités qu'il considérait comme des sciences secondaires, paraît-il, surtout la seconde), un ancien lui aussi pourtant, mais ouvert aux idées neuves, d'avoir eu son idée géniale d'étudier les pics d'iridium dans les couches K/T réparties dans le monde entier. Cette idée, aussi lumineuse qu'imprévue, allait entraîner toute une série de recherches et de résultats décisifs qui conduisirent à une double révolution de la géologie et de la paléontologie.

Maintenant, il est clair que tout retour en arrière est impossible. Une page de l'histoire des sciences est tournée. Le catastrophisme devra être enseigné, l'interdisciplinarité sera obligatoire pour bien comprendre les multiples aspects de *l'évolution à deux vitesses : gradualiste et catastrophiste*.

Notes

1. Collectif, *Dossier : La météorite, les dinosaures et le plancton*, La Recherche, 293, pp. 51-69, 1996. Cet excellent dossier contient sept articles différents et complémentaires : R. Rocchia, *Naissance d'une théorie*, pp. 53-55 ; J.-C. Doukhan et H. Leroux, *La preuve par les quartz*, pp. 56-57 ; E. Robin, *Le verdict du spinelle*, pp. 58-60 ; Ph. Claeys, *Chicxulub, le cratère idéal*, pp. 60-62 ; J. Smit, *Un épisode tragique : "l'océan Folamour"*, pp. 62-64 ; E. Buffetaut, *Tous les gros animaux disparaissent*, pp. 65-67 ; J.D. Archibald, *L'impact du retrait des mers*, pp. 67-69.

2. Ch. Frankel, *La mort des dinosaures : l'hypothèse cosmique* (Masson, 1996). Un excellent livre bourré d'informations.

3. D. Russell, *Les extinctions massives de la fin du Mésozoïque*, Pour la Science, 53, pp. 44-52, 1982.

4. H.H. Nininger, *Cataclysm and evolution*, Popular Astronomy, 50, pp. 270-272, 1942. Dans cet article, paru dans une revue astronomique grand public, Harvey Nininger annonce clairement, pour la première fois, qu'un impact important pourrait avoir été *la cause* de bouleversements *géologiques*, comme la fin des différentes ères, et aussi *la raison* des bouleversements *biologiques* associés. Il fait ressortir le catastrophisme de sa tombe, en liant *le cataclysm et l'évolution*. A ce titre, Nininger est un pionnier important, un peu oublié aujourd'hui, malheureusement.

5. M.W. de Laubenfels, *Dinosaur extinction : one more hypothesis*, Journal of Paleontology, 30, pp. 207-212, 1956. Dans cet article, de Laubenfels suggère qu'un impact cosmique pourrait être responsable de la mort des dinosaures et des autres espèces anéanties à la fin de l'ère secondaire.

6. H.C. Urey, *Cometary collisions and geological periods*, Nature, 242, pp. 32-33, 1973. Urey reprend l'idée de Nininger et lui donne une consistance physique. Il relie clairement les impacts cométaires sur la Terre et les frontières des ères géologiques.

7. De nombreux autres éléments "nobles" de la famille du platine ont été repérés dans les couches K/T, notamment le rhénium, le ruthénium, le palladium, le chrome, ainsi que des éléments plus courants comme l'or, le nickel et le cobalt. Tous présentent des concentrations anormalement élevées.

8. L. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro and H. Michel, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*, Science, 208, pp. 1095-1108, 1980. L'article historique sur la question.

9. K.J. Hsü, *Terrestrial catastrophe caused by cometary impact at the end of Cretaceous*, Nature, 285, pp. 201-203, 1980.

10. W. Alvarez, *La fin tragique des dinosaures* (Hachette, 1998). Titre original : *T.rex and the crater of doom* (1997). L'histoire moderne de la fin des dinosaures, vue par l'un de ses promoteurs : Walter Alvarez. Ce livre contient un important système de notes et de références sur les différents épisodes de cette saga scientifique. L'auteur raconte la découverte cruciale de la présence d'iridium dans la couche K/T et son travail les années suivantes. C'est son père physicien, Luis Alvarez, qui a eu l'idée d'étudier cette couche qui date de 65 MA et c'est lui, géologue, qui le premier l'a mise en pratique sur le terrain. Une fois lancée, cette idée a été reprise par de nombreuses équipes multidisciplinaires et leur a, en fait, échappé. Il n'empêche que le tandem Alvarez, père et fils, restera comme celui qui a apporté la preuve qui manquait et qui a ressuscité la notion de catastrophisme d'origine cosmique. La science leur doit beaucoup. Je rappelle quand même que Walter Alvarez ne croyait pas dans les années 1980 que Chicxulub puisse être le cratère d'impact recherché par tous les spécialistes de la question. Comme beaucoup d'autres, il a été obligé de faire son *mea culpa*. Il appelle dans son livre Chicxulub "le cratère maudit" (chapitre VI).

11. R. Rocchia, *La catastrophe de la fin de l'ère secondaire*, La Recherche, 260, pp.1344-1353, 1993.
12. M.J. Benton, *Scientific methodologies in collision : the history of the extinction of the dinosaurs*, Evolutionary Biology, 24, pp. 371-400, 1989.
13. D.A. Russell, *The enigma of the extinction of the dinosaurs*, Annual Revue of the Earth Planetary Sciences, 7, pp. 163-182, 1979.
14. M. Renard et R. Rocchia, *Extinction des espèces au Secondaire : la Terre dans un nuage interstellaire ?*, La Recherche, 153, pp. 393-395, 1984.
15. M.J. Benton, *Atlas historique des dinosaures* (Autrement, 1998). Titre original : *Historical atlas of the dinosaurs* (1996). Un livre très visuel avec de nombreux renseignements sur toute la période où ils ont vécu. Le livre est sous-titré : *1000 espèces, 160 millions d'années*.
16. C. Officer and J. Page, *The great dinosaur extinction controversy* (Addison-Wesley, 1996). Charles Officer a été l'un des leaders du courant "volcaniste" et l'un des grands adversaires de l'hypothèse cosmique. Il n'a jamais cru à l'importance des impacts dans les processus d'extinction et a même critiqué le caractère cosmique de Chicxulub, considérant cette structure comme étant d'origine volcanique.
17. V. Courtillot, *What caused the mass extinction : a volcanic eruption*, Scientific American, 263, 4, pp. 85-92, 1990.
18. V. Courtillot, *La Vie en catastrophes* (Fayard, 1995). Dans ce livre sous-titré : *Du hasard dans l'évolution des espèces*, Vincent Courtillot, partisan de l'origine volcanique de la fin du Secondaire, explique fort bien que les événements catastrophistes (quelle que soit leur origine, qui peut être variée et multiforme) peuvent être à la fois cause de *destruction* et de *renaissance*.
19. B.F. Bohor, E.E. Foord, P.J. Modreski and D.M. Triplehorn, *Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary*, Science, 224, pp. 867-869, 1984.
20. M. Zhao and J.L. Bada, *Extraterrestrial amino acids in Cretaceous/Tertiary boundary sediments at Stevns Klint, Denmark*, Nature, 339, pp. 463-465, 1989.
21. K. Zahnle and D. Grinspoon, *Comet dust as source of amino acids at the Cretaceous/Tertiary boundary*, Nature, 348, pp. 157-160, 1990.
22. J. Smit, A. Montanari, N. Swinburne, W. Alvarez, A.R. Hildebrand, S.V. Margolis, P. Claeys, W. Lowrie and F. Asaro, *Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico*, Geology, 20, pp. 99-103, 1992.

23. J. Bourgeois, T.A. Hansen, P.L. Wibertg and E.G. Kauffman, *A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas*, Science, 241, pp. 567-570, 1988.

24. A.R. Hildebrand and W.V. Boynton, *Proximal Cretaceous-Tertiary boundary impact deposits in the Caribbean*, Science, 248, pp. 843-847, 1990.

25. Dans son livre *La mort des dinosaures : l'hypothèse cosmique*, Charles Frankel raconte qu'un article de vulgarisation parut sur le sujet dans le quotidien de Houston (la ville de la NASA), le *Houston Chronicle* du 31 décembre 1981, sous la plume du journaliste Carlos Byar, article qui faisait la liaison indéniable entre la mort des dinosaures et le cratère du Yucatan (Chicxulub) découvert par Penfield et Camargo. Cet article prémonitoire ne fut lu, semble-t-il, par aucun scientifique (pourtant nombreux à Houston) et n'eut aucune suite. Il fallut attendre *dix ans* pour que Hildebrand et Boynton redécouvrent le cratère. Frankel précise aussi que Walter Alvarez lui-même entendit parler du site du Yucatan, mais comme étant une caldéra et donc sans intérêt ! C'est Carlos Byar qui mit en rapport Hildebrand avec Penfield et Camargo qui seront coauteurs du premier article sur le sujet, paru dans la revue *Geology* en septembre 1991. Cet article très important fut dans un premier temps refusé par la revue *Science* pour une assez sordide raison de rivalité scientifique.

26. A.R. Hildebrand, G.T. Penfield, D.A. Kring, M. Pilkington, A. Camargo, S.G. Jacobsen and W.V. Boynton, *Chicxulub crater : a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico*, Geology, 19, pp. 867-871, 1991.

27. Il est certain que plusieurs des astroblèmes terrestres *possibles* dont j'ai parlé au chapitre 11 ont un diamètre supérieur à celui de Chicxulub. Pour le moment, on n'a pas encore pu les associer à des extinctions, ou tout au moins à la fin d'étages géologiques. L'exemple de Chicxulub est symptomatique de la vitesse à laquelle peut disparaître à la vue un astroblème de grande taille.

28. A.A. Meyerhoff, J.B. Lyons and C.B. Officer, *Chicxulub structure : a volcanic sequence of the late Cretaceous age*, Geology, 22, pp. 3-4, 1994.

29. W.S. Wolbach, I. Gilmour, E. Anders, C.J. Orth and R.R. Brooks, *Global wildfire at Cretaceous-Tertiary boundary*, Nature, 334, pp. 665-669, 1988.

30. S.J. Gould, *La foire aux dinosaures* (Seuil, 1993). Titre original : *Bully for brontosaurus* (1991).

31. D.M. Raup, *De l'extinction des espèces* (Gallimard, 1993). Titre original : *Extinction. Bad genes or bad luck* (1991).

CHAPITRE 13

LES CONSÉQUENCES TERRESTRES

La Terre primitive façonnée par les impacts

La Terre, depuis 4,6 milliards d'années a subi une évolution continue d'une grande complexité (1/2), qu'il est donc difficile de reconstituer avec précision. L'impactisme a tenu une place de choix dans cette évolution, surtout pendant les deux premiers milliards d'années, quand une multitude de planètes vagabondes (les planétésimales) circulaient entre les huit (3) grosses planètes qui ont réussi à s'assurer une place définitive dans le Système solaire. Ces planétésimales ont largement contribué à l'augmentation du volume et de la masse des planètes, par suite de collisions très nombreuses, puisque le rythme de celles-ci était au moins 10 000 fois supérieur au rythme actuel durant les 500 premiers MA, puis encore 100 fois supérieur durant le milliard d'années suivant.

On sait, grâce à la superposition de couches de plus en plus denses à l'intérieur de la Terre, qu'il s'est produit une différenciation par gravité. Les matériaux cosmiques les plus denses se sont progressivement enfoncés dans un océan de roches et de minéraux en fusion, pour contribuer à former ou à renforcer le noyau terrestre (4) qui a, aujourd'hui, un diamètre voisin de 6900 km et une densité variant de 9 à 13,6 g/cm³.

Les géologues actuels pensent que la Terre primitive a fini, au bout de 600 MA (donc vers -4000 MA), par être enveloppée d'une croûte silicatée qui recouvrait pratiquement toute la surface du globe. En effet, les calculs ont montré que si l'on "déplisse" les continents et les îles, terrains précambriens compris, ils occupent la quasi-totalité de la surface terrestre actuelle (5), les quelques petits "trous" restants étant probablement dus à l'augmentation du volume terrestre depuis cette époque lointaine. Nous avons vu, en parlant des météorites, que la masse de la Terre augmentait très lentement, mais régulièrement, et il est donc logique que la surface de la croûte terrestre à la fin de son refroidissement définitif soit un peu insuffisante pour "tapisser" totalement la surface actuelle. La nouvelle croûte océanique formée en permanence ne fait que compenser la disparition des anciens matériaux qui, par l'intermédiaire des zones de subduction, réintègrent l'asthénosphère magmatique.

Cette croûte primitive fut probablement fissurée et déchirée par des causes à la fois terrestres (notamment la diminution de l'aplatissement qui passa de 1/60 à sa valeur actuelle 1/298,3) et astronomiques (collisions de planétésimales). Des cratères de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre, qui ont obligatoirement existé, ont pu contribuer à déterminer le tracé des premières fissures, ou même être à l'origine des dépressions océaniques originelles. C'est ainsi que plusieurs géophysiciens pensent que l'océan Pacifique primordial pourrait avoir été creusé à l'origine par un

astéroïde géant et qu'il aurait été à l'origine un astrolème gigantesque de 6000 km de diamètre (6). L'énergie libérée, tout à fait considérable, a pu être voisine de 10^{28} joules. La Terre entière a subi ce choc épouvantable, mais sans danger cependant pour son intégrité en tant que planète. Il faudrait, en effet, un impact libérant une énergie de 10^{31} joules, soit mille fois supérieure, pour que la Terre soit brisée et pour que ses constituants se dispersent dans l'espace.

Un argument d'un autre ordre prouve la réalité de ces très gros impacts sur les différentes planètes peu après leur formation : l'existence d'une inclinaison pour l'axe de rotation de ces planètes. Plus l'inclinaison est prononcée, plus les impacts ont été importants. L'astronome russe Victor Safronov (1917-1999) a montré (7) que pour la Terre, dont l'axe est incliné de $23^{\circ}27'$ pour la période actuelle, il a fallu un impact avec un corps céleste ayant 1/1000 de la masse terrestre, c'est-à-dire plus gros que les astéroïdes principaux actuels (Cérès, le plus gros, a 940 km). Mais cet impact eut lieu, très probablement, avant la consolidation de la croûte définitive. Il a fort bien pu désintégrer une première croûte insuffisamment résistante. Pour Uranus, qui a une inclinaison rétrograde (supérieure à 90°), l'objet de l'impact le plus important a pu atteindre 0,05 fois la masse de la planète, c'est-à-dire qu'il s'agissait d'une véritable planète. Cependant, l'introduction de la théorie du *chaos*, dans tous les problèmes concernant le Système solaire, pourrait remettre partiellement en cause certains résultats obtenus par Safronov, surtout pour ce qui concerne la Terre.

Quoi qu'il en soit, il est certain que les deux premiers milliards d'années du Système solaire ont été une partie de *billard cosmique* impitoyable. Toutes les planètes, et parmi elles évidemment la Terre, ont été enfantées dans la douleur. Si, par la suite, la vitesse de cratérisation sur les planètes et satellites à surface solide (et donc le rythme de l'impactisme planétaire en général) a diminué d'un facteur 100, tous ces corps célestes ont continué de subir, plus épisodiquement, des impacts plus ou moins violents. La Terre, on le sait par l'étude des impacts tardifs qui ont creusé les astrolèmes, a elle aussi subi ce bombardement céleste qui a contribué, pour une part non négligeable, à façonner la géographie de notre planète, telle que nous la connaissons aujourd'hui.

L'origine de la Lune

L'histoire de la formation de la Lune a toujours intrigué les astronomes (8). Ils croyaient enfin avoir découvert la bonne solution dans le courant des années 1970, quand un nouveau venu imprévu est venu brouiller le schéma savamment construit et amélioré par plusieurs générations de chercheurs. Ce nouveau venu, d'une importance incroyablement sous-estimée au départ, c'est *le chaos*. Nous verrons dans la section suivante les liens étroits qui unissent la Terre et notre satellite. Des liens si étroits, si fondamentaux, que nous ne serions pas là pour en parler si la Lune n'existait pas.

On sait que l'impact a eu lieu moins de 50 MA après la formation des deux planètes, durant la fameuse guerre des mondes, mais qu'elles étaient déjà toutes les deux différenciées. Aujourd'hui, près de 4500 MA après leur association forcée et particulièrement brutale, ces deux astres forment une même famille cosmique, étonnamment soudée.

Mais auparavant, il faut dire quelques mots sur l'origine de notre satellite. Trois hypothèses se sont longtemps trouvées plus ou moins concurrence, hypothèses abandonnées en 1976, quand une nouvelle théorie, mieux élaborée sur la base de simulations très pointues prenant en compte une multitude de données incontestables, les a envoyées directement dans l'histoire des sciences.

Les anciennes hypothèses

Pendant plusieurs décennies, trois hypothèses se sont partagées les faveurs des astronomes, qui n'étaient pas sans savoir cependant qu'aucune d'entre elles n'était vraiment satisfaisante, car toutes présentaient des faiblesses plus ou moins criantes.

1. *La Lune sœur de la Terre.* Dans cette hypothèse, les deux objets se sont formés séparément dans la même région de l'espace. C'est la théorie de *l'accrétion simultanée*, mais elle n'explique pas le déficit de fer dans notre satellite.

2. *La Lune fille de la Terre.* Dans cette hypothèse, la Lune se serait séparée de la Terre par effet centrifuge. C'est la théorie de la fission qui a le gros défaut de ne pas expliquer le problème du moment angulaire.

3. *La Lune cousine de la Terre.* Dans cette hypothèse, la Lune formée ailleurs dans le Système solaire aurait été capturée par la Terre à l'occasion d'une forte approche exceptionnelle. C'est la théorie de la *capture* qui ne résout pas le problème de la raréfaction du fer dans notre satellite et qui n'explique pas non plus l'origine du freinage pour expliquer la capture.

L'hypothèse de l'impact rasant avec la Terre

L'exploration de la Lune, à partir de 1969, et l'étude des échantillons lunaires ramassés par les astronautes américains ont clairement montré que les trois hypothèses anciennes sur l'origine de la Lune ne tenaient pas sur le plan scientifique, et qu'il convenait donc d'en imaginer une autre qui corresponde mieux aux données d'observation. On doit à William Hartmann et Donald Davis (en 1975), Alastair Cameron (1925-2005) et William Ward (en 1976) la nouvelle théorie de l'impact rasant.

Pour ces auteurs, et depuis pour de nombreux autres astronomes qui se sont ralliés à leur scénario probable, les choses se sont passées de la manière suivante. Il existait encore plusieurs protoplanètes rescapées dans le Système solaire intérieur après quelques dizaines de millions d'années.

L'une d'entre elles, de masse 0,10 à 0,15 masse terrestre (c'est-à-dire une masse voisine de celle de Mars) circulait dans la zone terrestre ($1,0 \pm 0,1$ UA) sur une orbite quasi circulaire comme celle de la Terre. L'objet, suite à des perturbations planétaires, a fini par se rapprocher de la Terre, à faible vitesse, et l'a percutée avec un angle presque rasant, de telle manière que la collision n'a détaché qu'une partie du manteau terrestre et n'a pas atteint le noyau de fer déjà formé. La chaleur colossale engendrée par l'impact a vaporisé toute la matière volatile et concentré les matières réfractaires du matériau lunaire.

Suite à cet impact entre deux corps célestes de masse importante, plus d'une masse lunaire de matière a été satellisée autour de la Terre sur une orbite extérieure à la limite de Roche. Ainsi, la matière n'a pas pu former un anneau permanent (ce qui aurait pu être le cas, tout au moins temporairement, dans le cas d'une orbite *interne* à la limite de Roche), mais bien un disque d'accrétion qui s'est progressivement regroupé autour du fragment principal pour former un nouvel objet *recomposé*, la Lune actuelle, formé en fait de l'ancienne proto-Lune et d'une partie de l'ancienne enveloppe externe et du manteau terrestres.

On peut rappeler schématiquement les six étapes principales de la formation de la Lune :

1. Un impact presque rasant, à faible vitesse (quelques km/s) entre deux corps célestes de grande taille déjà différenciés.
2. Le noyau de la proto-Lune pénètre une partie du manteau terrestre, sans toucher le noyau de fer.
3. Une importante quantité de silicates terrestres et le plus gros du matériel de la proto-Lune sont projetés dans l'espace.
4. Une fraction importante du matériel éjecté est satellisée en orbite terrestre à l'*extérieur* de la limite de Roche.
5. Le matériel satellisé forme un disque d'accrétion et les différents morceaux se regroupent progressivement autour des fragments principaux.
6. Le fragment principal finit par absorber tous les autres : c'est la Lune. Celle-ci subit à son tour un important bombardement de débris divers : c'est la cratérisation qui sera très importante dans un premier temps. La Terre et la Lune reprennent rapidement une forme quasi sphérique.

Les théoriciens du chaos n'aiment pas trop ces théories sur la formation de la Lune, même la dernière. Leur insatisfaction provient principalement de la faible probabilité qu'a un tel événement de se produire. Mais une chose est sûre : la Lune existe, et pour expliquer sa composition actuelle, l'hypothèse de l'impact rasant donne des résultats satisfaisants. Et il ne faut jamais oublier que le Système solaire, tel qu'on le connaît après 4600 MA

d'existence, est le résultat d'une *guerre des mondes* qui a engendré un nombre incalculable de collisions qui ne peuvent être prises en compte par les simulations, si brillantes soient-elles.

La Terre, la Lune et le chaos

Ce sont les spécialistes de la mécanique céleste, assistés aujourd'hui du remarquable outil de travail que constituent les ordinateurs à grande vitesse de calcul, qui ont levé le lièvre : *la Lune est indispensable à la stabilité même de la Terre*. Seuls des calculs sur le très long terme, prenant en compte le chaos, ont permis d'obtenir des résultats très importants et assez imprévus sur la stabilité du Système solaire et de ses différents membres. Dès 1988, on a appris que Pluton avait un mouvement très chaotique à l'échelle de 10 MA seulement et qu'il n'était pas une vraie planète, ce qui a été confirmé depuis par la découverte de la ceinture de Kuiper.

Et surtout, des travaux ultérieurs concernant toutes les planètes ont prouvé que le mouvement orbital des quatre planètes intérieures (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) était lui aussi chaotique (9). L'astronome français Jacques Laskar, au Bureau des Longitudes (où l'on étudie depuis toujours des problèmes d'astronomie mathématique et de mécanique céleste d'une manière pointue), a disséqué le mouvement extrêmement complexe du système Terre-Lune (10).

Pour bien comprendre l'importance de notre satellite sur la dynamique de la Terre, il a simulé ce que serait l'évolution des divers éléments orbitaux et caractéristiques physiques *sans la Lune*. En 1 MA seulement, ce qui est très peu à l'échelle astronomique, les variations d'obliquité de la Terre seraient de l'ordre de 15 degrés entre 15 et 30° en gros, ce qui entraînerait des variations de près de 20 % de l'insolation reçue à 65° de latitude nord. Sur de plus grandes périodes de temps, l'obliquité de la Terre pourrait aller de 0 à 85°. Comme l'explique Laskar :

" En l'absence de la Lune, la Terre présenterait donc des variations d'obliquité telles que le climat à sa surface serait terriblement modifié. Il faut en effet souligner que, avec une obliquité de 85 degrés, la Terre se retrouve pratiquement couchée sur son orbite, comme l'est Uranus. La quasi-totalité de la Terre subirait alors, comme c'est le cas actuellement pour les zones polaires, des jours et des nuits de plusieurs mois. Au pôle, le Soleil resterait longtemps très haut dans le ciel, et il est fort probable que de telles conditions d'insolation entraîneraient des modifications importantes de l'atmosphère de la Terre. " (11)

La question cruciale que sous-entend le résultat de Laskar est celle-ci : "*La Lune a-t-elle été déterminante dans l'apparition de la vie et surtout dans sa montée inexorable vers la complexité ?*". Car il ne paraît pas évident qu'une vie sophistiquée comme la nôtre soit capable de résister à de très importants changements climatiques quasi permanents à l'échelle astronomique.

On voit avec cette histoire de l'existence de la Lune actuelle, issue d'une collision majeure entre une proto-Lune et la Terre primitive, comment un cataclysme d'envergure peut déboucher à terme sur une vie telle que la nôtre, grâce à la présence d'un gros satellite stabilisateur. C'est une nouvelle preuve de cette réalité fondamentale que *le cataclysme est source de création*. Sans Lune, pas de vie telle que la nôtre, pas d'Homo sapiens.

Laskar conclut son étude avec une remarque très pessimiste sur l'espoir de trouver une vie extraterrestre comparable à la nôtre dans un système stellaire proche :

" La probabilité d'existence d'une planète de stabilité climatique comparable à la nôtre dans un système planétaire doit sans doute être revue à la baisse de plusieurs ordres de grandeur, et il faudra en faire de même pour la probabilité de réussite de ce projet [le projet SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*) concernant la détection de messages provenant de civilisations extraterrestres] de la NASA. " (12)

Mais de nombreux scientifiques sont nettement moins pessimistes que Laskar. Je montrerai dans les chapitres suivants que la vie existe partout dans l'Univers. Mais pas obligatoirement une vie comme la nôtre.

Pour les théoriciens du chaos dans le Système solaire, la nature chaotique des planètes intérieures provient de la présence de résonances entre les lents mouvements de précession des orbites de la Terre et de Mars d'une part, et entre celles de Mercure, Vénus et Jupiter d'autre part. La planète géante "fait le ménage" jusque dans la proche banlieue solaire. De ce fait, on ne peut prévoir l'avenir des planètes proches à très long terme. Jacques Laskar a calculé que les orbites de Vénus et de Mercure pourraient se couper dans un lointain futur et que Mercure pourrait être expulsé du Système solaire. Il suggère une autre solution possible : la collision entre Mercure et Vénus. Ainsi une des huit planètes rescapées de la guerre des mondes, après un très long sursis, pourrait disparaître. Comme quoi, à cause de l'imprévisible chaos, l'impactisme planétaire n'est pas encore fini.

Les conséquences astronomiques de l'impactisme

Elles ont dû être importantes les deux premiers milliards d'années du Système solaire (13), durant la période très agitée de *la guerre des mondes*, quand de nombreux planétoïdes géants, et pas seulement la Lune, circulaient encore entre les planètes que nous connaissons de nos jours.

Les éléments orbitaux de la Terre ont subi des modifications par rapport aux valeurs originelles. L'importance de l'altération du demi-grand axe (a) et de l'excentricité (e) n'est pas connue, et ne le sera jamais. Par contre, nous avons dit que l'inclinaison (i) est passée d'environ 0° , valeur probable lors de la formation des protoplanètes, à 23° , ce qui est considérable. Nous avons vu

qu'en l'absence d'un satellite massif comme la Lune, capable de stabiliser le système Terre-Lune à l'intérieur de valeurs ne sortant pas d'une fourchette assez étroite, le phénomène du chaos aurait pu entraîner encore des modifications d'une tout autre ampleur.

Aujourd'hui, il n'y a plus de risque de changements majeurs pour ces trois éléments, dits éléments caractéristiques, du fait de la masse insignifiante des astéroïdes et des comètes qui frôlent la Terre par rapport à celle-ci. Il ne faut pas oublier cependant que les divers éléments orbitaux de la Terre (et des autres planètes) subissent des perturbations à long terme qui n'ont rien à voir avec l'impactisme. Ces perturbations sont dues à l'interaction des planètes les unes sur les autres, et font osciller les éléments moyens entre deux extrêmes, variables selon chaque planète.

Les impacts d'astéroïdes et de comètes ont probablement eu également une incidence sur la période de rotation de la Terre, qui était bien différente dans le passé de ce qu'elle est actuellement. Ces variations, sans doute minimes, ont pu être en plus ou en moins selon la géométrie de l'impact : accélération de la rotation quand la vitesse de l'impact s'additionnait à celle de la Terre et, au contraire, ralentissement quand les vitesses étaient de sens contraire. Ces variations ne doivent pas être confondues avec le ralentissement connu de la rotation terrestre, en relation avec l'éloignement séculaire de la Lune.

Enfin, il est probable que la majorité des collisions d'envergure d'objets cosmiques avec la Terre ont provoqué d'importantes transformations ou perturbations dans le champ magnétique de notre planète et dans la magnétosphère. J'aurai à revenir sur les conséquences de ces perturbations qui présentent une fréquence et un danger considérés comme inquiétants, pour ne pas dire alarmants, à l'échelle astronomique, pour la stabilité des espèces terrestres.

Les conséquences géographiques de l'impactisme

Elles ont dû être variables selon l'énergie libérée par les impacts. Dans le cas de petits objets, c'est-à-dire la très grande majorité, les dégâts causés n'ont pas dépassé l'importance de dégâts locaux et tout à fait secondaires, insignifiants à l'échelle de la planète. Mais il est certain que les gros impacts du passé et que les rares NEO (*Near Earth Objects* = astéroïdes et comètes) de bonne taille (plusieurs kilomètres de diamètre) existant encore, ont pu, peuvent et pourront, à moyen et long terme, causer des cataclysmes ayant des répercussions à l'échelle *régionale* ou même *planétaire* pour les plus gros d'entre eux.

Les petits impacts créent des cratères météoritiques de forme sensiblement circulaire (ou quelquefois "carrée") qui deviennent ensuite des astroblèmes. Ceux-ci peuvent servir de cuvettes lacustres (lacs et mers) dans les régions humides. On s'est rendu compte, depuis une soixantaine d'années, que de

très nombreux lacs se sont formés dans des cratères météoritiques (14) (cas de Sithylenkat notamment), ce qui ne simplifie pas leur détection.

Des impacts plus importants peuvent entraîner la transformation de zones côtières par suite de l'enfoncement de la croûte terrestre (cas pour plusieurs astroblèmes hypothétiques dont nous avons parlé comme le golfe de Campêche, la baie d'Ungava, etc.). D'autre part, il peut se produire des bouleversements géographiques consécutifs à des réactions isostatiques et des mouvements tectoniques, eux-mêmes dus à des impacts de bonne taille.

Des bouleversements au niveau de la *cryosphère* (ensemble des glaces terrestres et marines) peuvent se produire si l'impact a lieu dans une région polaire. Une déglaciation totale ou partielle entraîne à moyen terme une transgression marine (montée du niveau des eaux). Celle-ci affecte sérieusement le tracé des côtes et défigure l'image classique des continents, tels que nous les connaissons aujourd'hui. La géographie de la Terre est essentiellement changeante et varie régulièrement au cours des siècles.

Il y a de nombreuses autres conséquences géographiques consécutives à des impacts importants, mais elles sont surtout des sous-produits de conséquences géologiques et géophysiques plus profondes. En effet, de nombreuses conséquences se recoupent ou sont les mêmes vues sous un éclairage différent selon la nature de l'approche scientifique.

Les conséquences atmosphériques de l'impactisme

J'ai déjà eu l'occasion d'en parler dans certains chapitres et nous les retrouverons encore dans des chapitres ultérieurs. Aussi je vais juste, dans cette section, les rappeler très sommairement à titre d'inventaire (15). Elles vont souvent de pair avec d'autres, avec des intensités et donc des conséquences inégales selon *la nature* et aussi *l'énergie* de l'impact responsable.

– *Effet de serre* (16). Il s'agit du processus d'échauffement des couches basses de l'atmosphère dû à l'absorption de certains gaz, notamment le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O). Mais des gaz émis par les activités humaines jouent également un rôle, comme les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC). Un impact sérieux en libérant une formidable quantité de poussières de nature diverse est en mesure de participer à l'augmentation de l'effet de serre, souvent en association avec un *hiver d'impact*.

– *Couche d'ozone*. On sait qu'elle est menacée à la fois par les agressions cosmiques et les activités humaines. Les radiations solaires énergétiques modifient d'une manière significative sa composition, mais elle se recompose en permanence dans le cadre de processus photochimiques liés à l'atmosphère. Les ultraviolets dissocient l'oxygène moléculaire (O₂) en deux

atomes d'oxygène qui se recombinent chacun avec une molécule d'oxygène pour faire de l'ozone (O₃). Une diminution de 5 % de la couche d'ozone entraîne une augmentation de 10 % des UV b, biologiquement actifs. Donc, à forte dose, les UV provoquent des dégâts au niveau des cellules pouvant entraîner des *cancers* de la peau et des cataractes.

– *Pluies acides*. Sous ce terme générique, on regroupe divers agents acidifiant les milieux naturels (notamment des brouillards, gaz, aérosols et dépôts secs lessivés par des précipitations) qui contaminent ou même empoisonnent plus ou moins les sols, la végétation et les eaux de surface et souterraines. Cette grave perturbation atmosphérique provoque un dépérissement de la végétation et un bouleversement des conditions de vie, aussi bien pour les animaux que pour les humains (maladies respiratoires, affections aux yeux notamment). Les pluies acides seraient une conséquence quasi obligée d'un hiver d'impact et compliqueraient sérieusement la survie post-impact des rescapés du cataclysme lui-même.

– *Perturbations atmosphériques*. Elles sont inévitables évidemment après un impact, même relativement modeste. Dans un premier temps, on se trouve en présence d'un effet de souffle qui peut être impressionnant et qui dérègle le mécanisme normal de l'atmosphère. Des vents de grande intensité et des tornades très violentes (atteignant l'échelle F4, 340-410 km/heure, et même F5, 420-510 km/heure) sont probables. Les courants-jets ordinaires de l'atmosphère subissent des perturbations très importantes et des précipitations exceptionnelles inondent certaines régions. Ces perturbations post-impact sont nombreuses et variées, mais elles ne sont jamais irréversibles, l'atmosphère reprend après une période plus ou moins longue ses caractéristiques et son activité normales.

– *Pollution atmosphérique*. C'est la modification de l'état physico-chimique de l'atmosphère, notamment au niveau de la composition de ses éléments mineurs. On sait que les cataclysmes terrestres (notamment volcaniques) et l'activité humaine depuis l'époque industrielle sont responsables d'une pollution atmosphérique pratiquement ininterrompue de nos jours, avec des conséquences diverses : réchauffement de la planète, corrosion chimique accélérée, altération des tissus et des cellules. Bien entendu, un impact, même d'envergure locale (comme celui de la Toungouska), engendre une pollution atmosphérique proportionnelle à l'énergie dégagée. Les incendies géants qui peuvent suivre un impact doivent participer aussi activement à la pollution atmosphérique et à la non-viabilité provisoire des régions dévastées.

– *Hiver d'impact*. C'est la période post-catastrophe qui regroupe tous les effets nocifs engendrés par l'impact. L'opacification de l'atmosphère par les poussières et les suies en suspension, associée à une période de grand froid pouvant aller jusqu'à la glaciation, peut entraîner une décimation de certaines espèces et même dans certains cas l'extinction pure et simple. Dans un deuxième temps, l'hiver peut laisser la place, suite à l'effet de serre,

à un réchauffement progressif comme cela s'est produit il y a 65 MA (voir le chapitre 12 sur l'extinction des dinosaures).

Fracturations et perforations de la croûte terrestre et leurs conséquences

J'ai parlé plus haut de la Terre primitive façonnée par les impacts. Mais, même si l'impactisme terrestre actuel n'est plus que résiduel par rapport à l'impactisme originel, ses effets restent sévères au niveau de la croûte extérieure. Certains géophysiciens pensent que la fracturation des plaques tectoniques pourrait s'expliquer assez bien par des impacts d'astéroïdes de bonne taille. Les plaques actuelles ne sont pas les plaques primitives, qui n'existent plus depuis longtemps, de sorte que le phénomène se renouvelle régulièrement. Selon leur masse, les astéroïdes peuvent fracturer, ou seulement fissurer, la croûte terrestre et notamment la croûte océanique qui est bien moins épaisse que la croûte continentale granitique.

On sait depuis longtemps que l'océan Pacifique originel est regardé par certains astronomes comme un gigantesque astroblème primitif possible (17). L'ouverture de l'Atlantique, beaucoup plus récente, pourrait avoir été causée par un impact, il y a environ 180 MA. On voit que la géographie du globe peut avoir été sérieusement affectée, à long terme, par des processus géophysiques consécutifs à des impacts importants.

Il en est de même pour la minéralogie terrestre. Et, il ne faut pas se le cacher, ce n'est pas uniquement pour des raisons scientifiques que les cratères d'impact fossiles ont été si soigneusement étudiés à partir des années 1960, notamment dans l'ex-URSS. On en attend, en effet, de sérieuses retombées économiques, car les chercheurs sont persuadés que les astroblèmes géants sont associés à des trésors minéralogiques, du fait que la fissuration ou la perforation locale de la croûte terrestre entraînent des événements magmatiques particuliers.

J'ai déjà parlé de l'astroblème canadien de Sudbury (au chapitre 11), vieux de deux milliards d'années, et qui avait à l'origine un diamètre de 140 km. Aujourd'hui, ce n'est plus qu'une structure synclinale de 58 x 22 km. Mais à l'intérieur de cette structure, se trouvent les deux tiers des réserves connues de nickel de toute la planète. Il y a là une coïncidence qui a d'abord fait tiquer les spécialistes, mais aujourd'hui personne ne croit plus à une coïncidence. Car, si au début, certains ont pensé que le fabuleux stock de nickel de Sudbury était tombé du ciel avec l'astéroïde responsable du cratère, on s'est vite rendu compte que cette hypothèse ne tenait pas. Aujourd'hui, on est persuadé que le nickel existait déjà avant l'impact dans le sous-sol canadien, mais il était situé à une profondeur de plusieurs dizaines de kilomètres, sous forme de magma à haute teneur métallique. Après la perforation locale due à l'impact, le magma s'infiltra par l'ouverture pour envahir le cratère, où il est resté piégé par la suite après son refroidissement. L'impact fut un "cadeau" pour les hommes d'aujourd'hui.

Ce qui s'est passé à Sudbury s'est produit ailleurs. Depuis que les scientifiques ont compris cela, c'est la course aux astroblèmes géants. Les crédits de recherche se débloquent, car on sait maintenant où l'on a les meilleures chances de trouver la trace, pas toujours évidente autrement, de nouveaux gisements. Ceux-ci peuvent avoir été créés à la suite de collisions, mais à partir de matériaux internes préexistants. Il faut toutefois souligner que les calculs montrent que le diamètre des astroblèmes "créateurs de minerais" doit avoir plus de 80 km, valeur minimale pour que la croûte soit perforée, ou du moins fissurée, et pour que le magma sous-jacent soit affecté. Mais les astroblèmes plus petits recèlent aussi leurs trésors, plus modestes mais loin d'être négligeables pour autant.

Les chercheurs de l'ex-URSS ont noté que certains grands astroblèmes recensés sur leur territoire sont associés à des réserves de gaz naturel, à des schistes bitumeux et à certains métaux. Celui de Popigai est la principale réserve mondiale de diamants. Les Sud-Africains s'intéressent, eux, au *Bushveld Complex*, vaste région de 67 000 km² que l'on soupçonne d'avoir été remodelée, il y a environ 2,2 milliards d'années, à la suite de l'impact d'un gros EGA fractionné au dernier moment en quatre morceaux principaux, l'un d'eux ayant créé l'astroblème voisin de Vredefort (le léger écart dans les âges supposés n'est pas significatif d'une origine distincte). Ce complexe a été recouvert par des intrusions magmatiques venues de plusieurs kilomètres de profondeur. Il est aujourd'hui une source majeure de métaux du groupe du platine, de chrome et de fer, et constitue une source de profits importants pour les Sud-Africains. L'Afrique du Sud doit au *Bushveld Complex* une partie de sa prospérité.

Citons encore les Mexicains qui ont vu, dans les années 1970, augmenter très sérieusement leurs réserves pétrolières. Cela grâce aux découvertes effectuées, suite à des sondages spécialisés par des compagnies pétrolières, dans le golfe de Campêche, que certains soupçonnent fortement d'être un gigantesque astroblème très ancien, sans aucune parenté avec celui de Chicxulub situé dans la même région, mais beaucoup plus récent (65 MA). Comme beaucoup d'autres formations géantes similaires en *arc de cercle*, le golfe de Campêche n'est actuellement considéré que comme un astroblème "hypothétique", mais là encore la coïncidence est frappante, même si l'on saisit encore mal le "pourquoi" de l'association astroblème - pétrole.

Ces quelques exemples montrent bien l'importance pratique de ces astroblèmes, dont l'existence même était totalement insoupçonnée il y a seulement soixante-dix ans. Ils sont associés dans de nombreux cas à des trésors minéralogiques qui sont, c'est le cas de le dire, un don du ciel pour les hommes d'aujourd'hui. Inutile de préciser, par contre, que lors de leur formation, ces trésors (trésors pour nous !) ont occasionné la disparition de milliers de formes vivantes. *Création d'un côté, destruction de l'autre, c'est la loi première de la nature.*

Périodes glaciaires et variations climatiques

Depuis le début des années 1970, les spécialistes des climats (18/19) ont clairement démontré le pourquoi et le comment de la paléoclimatologie, qui occupe désormais une place privilégiée dans les sciences de la Terre. L'un d'eux, le belge Étienne Bernard, a conclu à la " *prodigieuse connivence entre les causes cosmologiques, astronomiques, astrophysiques, géophysiques et géologiques pour réaliser et maintenir les conditions climatiques propices à l'éclosion de la vie et à son évolution.* " (20)

Dès 1940, le savant serbe Milutin Milankovic (1857-1936) (21) avait montré que les alternances climatiques de grande ampleur obéissent à trois cycles principaux de durée variable. Ces trois cycles *astronomiques* sont ceux de l'inclinaison de l'axe terrestre ou de l'obliquité de l'écliptique (moyenne : 41 000 ans, fourchette : 37 000 à 44 000 ans), de l'excentricité de l'orbite terrestre (moyenne : 95 400 ans, fourchette : 81 000 à 106 000 ans) et de la révolution du périhélie de la Terre (moyenne : 21 550 ans, fourchette : 15 600 à 27 700 ans). La combinaison de deux, et à plus forte raison des trois cycles, peut entraîner l'arrivée ou la disparition d'une période glaciaire, selon que cette combinaison est favorable ou défavorable.

Mais à ce maintien dans des limites connues et relativement étroites des conditions climatiques terrestres, maintien qui semble être la règle et qui dure depuis plusieurs centaines de millions d'années, il est certain que viennent se greffer de temps à autre des " *accidents de parcours* " dus aux impacts d'astéroïdes ou de comètes. Ces accidents mettent à bas, pour un temps plus ou moins long, le bel ensemble des grands cycles climatiques naturels, tels qu'ils découlent principalement des lois de la mécanique céleste. On sait aujourd'hui que certaines grandes divisions géologiques (ères et périodes) sont effectivement les conséquences de "ces accidents cosmiques". On peut rappeler les trois plus connues :

- la séparation Crétacé-Éocène, il y a 65 MA ;
- la séparation Éocène-Oligocène, il y a 35 MA ;
- la séparation entre le Paléolithique inférieur et le Paléolithique moyen, il y a 700 000 ans.

Mais des impacts beaucoup moins importants peuvent produire les mêmes effets dans certains cas. D'autres, sans vraiment causer des périodes glaciaires, peuvent entraîner de sérieux refroidissements sur l'ensemble de la planète.

La raison principale de ces importants changements climatiques d'origine cosmique est probablement due à la diffusion d'un énorme volume de poussières et de particules microscopiques (de 1 à 0,01 micromètre) dans la haute atmosphère (22). L'intérêt du phénomène est qu'il peut être causé par les trois catégories d'impacts : impacts sur les terres émergées, impacts océaniques et explosion dans l'atmosphère d'EGA cométaires ou de comètes, même s'il s'agit d'objets relativement modestes. Quand l'énergie libérée

atteint ou dépasse 10^{18} joules, c'est-à-dire pour des objets à partir de 200 mètres, il y a obligatoirement production intense de poussières et de particules microscopiques qui sont éjectées dans la haute atmosphère. Cet aérosol entraîne une diminution substantielle de l'insolation de la Terre, et, par conséquence, des variations climatiques pouvant dépasser plusieurs degrés et conduire dans certains cas à des périodes glaciaires.

Mais dans ce domaine des variations climatiques, comme dans beaucoup d'autres que j'ai déjà étudiés, il ne faut pas perdre de vue que parfois des événements terrestres, en l'occurrence ici des éruptions volcaniques, peuvent conduire aux mêmes conséquences. Il serait donc très exagéré d'attribuer aux gros impacts la paternité de toutes les grandes variations soudaines dans le domaine climatique. On a l'exemple assez récent de l'éruption cataclysmique du *Tambora*, dans l'île de Sumbawa en Indonésie, en 1815, connue pour être la plus énergétique des temps historiques avec son énergie totale libérée égale à 10^{20} joules. Au cours de cette éruption, le mont Tambora perdit 1250 mètres de sa hauteur et éjecta près de 150 km^3 de débris divers, notamment sous forme de fines poussières et de cendres. C'est une fantastique quantité de particules qui atteignit les hautes couches atmosphériques et qui fut entraînée par la suite vers d'autres latitudes au gré des courants aériens. En 1816, l'aérosol existait encore en si grande quantité que l'ensoleillement fut très déficitaire, et que cette année-là fut appelée "*l'année sans été*" (23). Elle fut la plus froide que l'on ait connue, avec d'innombrables conséquences humaines et économiques.

On voit avec cet exemple terrestre, les conséquences qu'a pu (et que pourrait encore) entraîner une diminution sensible de l'insolation sur Terre causée par un impact d'envergure. Un refroidissement rapide et important de notre planète (et quelle qu'en soit la cause : astronomique ou purement terrestre) peut conduire irréversiblement à une époque glaciaire du fait des effets cumulatifs des phénomènes d'accompagnement, notamment la persistance d'un sol gelé sur des régions entières et l'augmentation du volume des glaciers. Car il ne faut pas oublier que la neige a un albédo (pouvoir réflecteur) particulièrement élevé (0,84 en moyenne), ce qui débouche sur une réflectivité accrue de la surface terrestre enneigée. En clair, cela veut dire que le sol enneigé renvoie dans l'espace la plus grande partie de l'apport calorifique solaire au lieu de l'absorber, et qu'il accélère ainsi lui-même l'emprise des glaces à ses dépens. Passé un certain seuil critique d'accumulation de neige et de glace, une glaciation peut devenir autoperpétuante.

Les conséquences des impacts océaniques

Les impacts océaniques ne participent pas à la cratérisation *apparente*, et certains de leurs effets sont assez différents de ceux causés par des impacts sur les terres émergées ou même ceux qui peuvent avoir lieu en mer peu profonde, sur les talus continentaux, par exemple, et qui sont régis pratiquement par les mêmes règles.

Un petit EGA de quelques dizaines de mètres provoque juste un tremblement de terre proportionnel à l'énergie libérée et un important tsunami. Cela arrive fréquemment, mais de tels impacts sont des catastrophes très secondaires sur le plan énergétique qui n'ont aucune conséquence sérieuse à l'échelle planétaire. Sur le plan humain, c'est une autre affaire comme nous allons le voir.

Il n'en est pas de même si l'EGA dépasse deux kilomètres de diamètre. On peut alors envisager *une fissuration de la croûte océanique* avec des conséquences autrement cataclysmiques. On sait que cette croûte océanique est beaucoup moins épaisse, et donc plus fragile, que la croûte continentale. On sait aussi que les volcans sous-marins sont fréquents, et qu'en de multiples endroits le magma affleure la surface terrestre, sous les océans comme sous les terres émergées.

Si une fissuration de la croûte océanique est effective après un impact sérieux, le magma sous-jacent est libéré et devient capable de faire localement bouillir la mer. Une fantastique quantité d'eau de mer, dépendant évidemment de la surface de la fissure et des températures dégagées, peut se transformer en vapeur. Cette vapeur d'eau se mélange ensuite avec les débris des roches basaltiques pulvérisées par l'impact et avec toutes sortes de gaz, de poussières, de laves et de cendres éjectées à la fois par le magma fissural et par les autres volcans immergés et émergés de la région choquée. Toute cette matière hétéroclite s'agglutine pour former de formidables nuages opaques, qui doivent se répartir ensuite tout autour de la Terre en quelques jours. Ces nuages se comportent comme une véritable carapace dans la troposphère et la stratosphère, capable là encore d'obscurcir le Soleil pendant plusieurs mois, voire même pendant plusieurs années. Une conséquence presque certaine est un *déluge mondial* colossal et éventuellement une période glaciaire, du fait de l'ensoleillement très déficitaire. On parle de nos jours d'*hiver d'impact*.

Le danger des tsunamis d'origine cosmique

L'autre conséquence importante d'un gros impact océanique est la formation d'un tsunami, véritablement fantastique celui-là (et sans commune mesure avec les tsunamis "courants" rappelés plus haut), puisque pouvant atteindre plusieurs kilomètres de hauteur. La force de pénétration d'une telle vague doit être prodigieuse, quand on connaît déjà celle des tsunamis purement terrestres qui peuvent dépasser trente mètres et pénétrer à 500 km à l'intérieur des côtes. Certains tsunamis d'origine cosmique doivent tout balayer sur leur passage sur plusieurs milliers de kilomètres à l'intérieur des côtes et peut-être, dans certains cas, faire le tour de la Terre. Inutile de parler des destructions qui en découlent, chacun de ces extraordinaires tsunamis étant capable de rayer du monde vivant de nombreuses espèces.

Les simulations modernes montrent bien que ce problème des tsunamis d'origine cosmique a été terriblement sous-estimé jusqu'alors (24/25). Il s'agit d'un problème assez délicat car ces simulations donnent des valeurs

parfois différentes selon les paramètres utilisés (qui ne peuvent être que des approximations), mais des ordres de grandeur se dégagent qu'il est utile de connaître. Des données chiffrées ont été publiées sur ce sujet, des chiffres assez inquiétants, tant en ce qui concerne la hauteur des vagues engendrées que la fréquence de cette catégorie de cataclysme.

Il apparaît qu'un impact océanique d'un astéroïde de type S de 50 mètres seulement peut engendrer un tsunami de 30 mètres à 1000 km de distance et une sidérite de même diamètre un tsunami de près de 80 mètres qui serait tout à fait catastrophique pour les régions côtières inondées. Mais il y a vite inflation. Un petit EGA de 300 mètres, avec une vitesse d'impact de 20 km/s peut générer un tsunami de près de 1 km de hauteur, ce qui paraît presque incroyable et surtout terriblement dévastateur. Gare au prochain, car il s'agit d'un événement qui reste possible à l'échelle du millénaire. Si l'on monte dans la gamme des impacts océaniques kilométriques, les tsunamis générés atteignent plusieurs kilomètres et peuvent dans certains cas faire quasiment le tour de la Terre. Et il ne faut jamais oublier qu'à l'échelle astronomique ce phénomène est courant.

Nous avons vu dans la partie historique que certains savants du passé, comme Whiston, Buffon, Laplace, Cuvier et d'Orbigny, considéraient le catastrophisme comme l'une des clés de l'histoire ancienne de la Terre. On sait aujourd'hui qu'ils étaient dans le vrai, même s'ils ont été raillés par plusieurs générations postérieures de scientifiques moins perspicaces, même s'ils n'ont pu faire admettre à leurs contemporains (faute de preuves astronomiques ou géophysiques incontestables à leur époque) que la principale raison de ce catastrophisme à très grande échelle ne peut être que d'origine cosmique.

J'ai rappelé au chapitre 3 les propos de Cuvier concernant les mouvements des eaux océaniques sur les continents, et notamment la dernière vague géante qui "*par un double mouvement a inondé et ensuite remis à sec nos continents actuels...*" (26). Quel cataclysme correspond mieux à cette vision d'apocalypse qu'un tsunami *géant* d'origine cosmique ? A l'évidence aucun.

Les collisions océaniques sont à la fois fréquentes et donc fort dangereuses pour la Terre, ou tout au moins pour sa couche externe. C'est peut-être l'une des raisons pour lesquelles le plancher océanique est partout très récent (moins de 200 MA, c'est-à-dire moins de 1/20 de l'histoire de la Terre) et se renouvelle constamment. Les cicatrices océaniques ont à peine le temps de se refermer, que déjà de nouveaux corps célestes les rouvrent. La Terre a toujours été, et reste encore plus de 4 milliards d'années après sa formation, une planète perpétuellement meurtrie. La vie, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, n'en a eu que plus de mérite pour prendre racine, subsister et se développer sans cesse au sein d'un monde planétaire somme toute relativement hostile.

Les petits impacts sont des pichenettes à l'échelle terrestre, mais quand on descend à l'échelle humaine, il en va bien sûr tout autrement. Ces tsunamis

d'origine cosmique pourraient faire des millions de victimes et des dégâts sur le plan économique impossibles à chiffrer.

Un impact océanique il y a 2,15 millions d'années

La détection des impacts océaniques du passé est difficile, et jusqu'à présent on n'a pu repérer que très peu d'astroblèmes sous-marins *incontestables*, la sédimentation jouant rapidement un rôle primordial, comme on l'a vu avec l'astroblème de Chicxulub, pourtant très important et relativement récent. Des anomalies gravimétriques sont parfois mises en évidence, mais la corrélation avec un impact n'est jamais apportée avec certitude.

C'est tout l'intérêt de la découverte d'un impact possible (27) dans les années 1960 par l'équipage du navire de recherche américain l'*Eltanin*, qui étudiait principalement l'ancienne activité glaciaire dans le sud de l'océan Pacifique, où il effectuait des carottages en eau profonde. Certains échantillons remontés en surface semblaient concerner des débris d'astéroïde.

En 1981, le géochimiste américain Frank Kyte mit en évidence dans certaines de ces carottes océaniques, datées précisément de 2,15 MA, la présence d'iridium, quasiment signature d'un impact cosmique d'importance, et postula donc fort logiquement pour une collision d'astéroïde dans la mer de Bellingshausen, près des côtes antarctiques, à environ 1400 km à l'ouest de la pointe de l'Amérique du Sud. On donna même à cet astéroïde fantôme le nom d'*Eltanin*, en souvenir du rôle essentiel joué par le navire de recherche américain.

En 1997, des recherches multidisciplinaires ont confirmé l'impact. Un impact important puisque le diamètre de l'objet (probablement un vrai astéroïde) a été évalué entre 1 et 4 km et l'énergie libérée de l'ordre de 100 000 MT de TNT. L'impact dans l'océan a soulevé une colonne d'eau haute de près de 5 km et le tsunami associé a atteint l'Amérique du Sud et l'Antarctique. Un torrent de poussières, de vapeur et d'autres débris salés furent dispersés à plusieurs milliers de kilomètres, tant et si bien que les chercheurs ont retrouvé la présence de fossiles contemporains du cataclysme au sommet des montagnes proches du pôle sud.

Kyte et ses associés pensent maintenant que l'impact d'*Eltanin* a été la cause d'une importante période de glaciation située tout de suite après la collision, glaciation consécutive à un très important refroidissement, probablement dû à un effondrement (plusieurs degrés au moins) de la chaleur reçue au niveau du sol. C'est donc un nouvel exemple, après Chicxulub, d'un important hiver d'impact dû à un impact océanique. Il sera intéressant d'étudier plus précisément toutes ses conséquences, à la fois sur le climat, mais aussi sur la vie de nos ancêtres, traumatisés devant un tel cataclysme, surtout par la disparition du Soleil pendant quelques semaines au moins et par la dégringolade de la température.

Inversions du champ magnétique liées aux impacts ?

J'ai parlé au chapitre 8 de la magnétosphère, notre bouclier naturel ultra-performant en période normale, et des inversions géomagnétiques qui se produisent en moyenne deux fois par million d'années mais dont les conséquences sont désastreuses pour la biosphère et ses habitants, surtout les plus fragiles. Je reviens ici sur le sujet sous l'aspect "*conséquences*".

Les inversions du champ magnétique terrestre consécutives à des impacts de comètes ou d'astéroïdes sont une quasi-certitude (28), acquise dans le courant des années 1960. Il y a donc lieu de les étudier avec soin. Le point d'interrogation au titre de section signifie qu'il y a quand même un doute, contrairement à ce que l'on a cru longtemps. Il pourrait s'agir, selon certains chercheurs, d'une simple coïncidence de dates très proches à l'échelle astronomique, entre celles des inversions proprement dites et celles des cataclysmes supposés responsables associés. Il est difficile, en effet, à quelques milliers d'années près, d'affirmer avec certitude qu'il y a corrélation. L'avenir pourra probablement trancher ce dilemme d'une importance fondamentale.

Les scientifiques croient que le champ magnétique terrestre résulte de ce qu'on appelle "l'effet dynamo", qui serait dû principalement à une légère différence de vitesse de rotation entre le noyau métallique et le manteau basaltique enveloppant. La conductivité électrique différente engendrerait l'aimantation observée.

Dans les années 1960, ces fameuses années révolutionnaires pour l'étude de la Terre, les physiciens et géophysiciens ont commencé à étudier dans le détail le problème crucial de la magnétisation fossile des roches (le paléomagnétisme) pour tenter de retracer l'histoire passée du champ magnétique de notre planète. On sait que lorsqu'une roche contenant des oxydes de fer se forme par cristallisation à partir d'un magma, ou par précipitation à partir d'une solution aqueuse, elle acquiert une polarisation magnétique orientée parallèlement au champ magnétique terrestre.

Les chercheurs se sont rendu compte depuis les années 1950 que les fonds océaniques avaient "fossilisé" de très nombreuses inversions magnétiques. En effet, les roches ont successivement une polarité normale (c'est-à-dire dont la direction de magnétisme rémanent est orientée comme le champ magnétique actuel) et une polarité inversée. Ce phénomène est valable pour l'ensemble de la planète.

Cette très importante découverte a permis aux spécialistes de préciser le "calendrier magnétique" de la Terre des 200 derniers MA. Ce calendrier est découpé en périodes directes et inverses d'une durée moyenne de 500 000 ans à 1 MA, et en événements, inversions de très courtes durées (moins de 50 000 et même de 10 000 ans parfois) d'importance secondaire à l'intérieur

des périodes principales. Certains de ces événements récents de faible ampleur n'ont eu qu'une incidence locale ou régionale.

Comme pour les déplacements de la lithosphère, plusieurs causes peuvent être retenues pour ces inversions géomagnétiques : certaines sont purement terrestres et d'autres sont astronomique. La dernière inversion du champ magnétique de la Terre, dite inversion Brunhes/Matuyama, date d'environ 700 000 ans. Depuis cette époque, nous sommes dans une période de polarité directe, appelée période de Brunhes, du nom du physicien français qui le premier, dès 1906, a découvert que le magnétisme fossile des roches présente des inversions de polarité. On sait également que cette date de 700 000 ans est celle du très gros impact d'astéroïde qui a créé l'astroblème fantôme de Wilkes Land et les australasites, les tectites qui lui sont associées.

En 1967, deux chercheurs américains, Bill Glass et Bruce Heezen (1924-1977) (29) ont émis l'idée originale que la formation de ces tectites d'Australasie et l'inversion géomagnétique devaient avoir *une cause commune*, la coïncidence des dates étant trop troublante. Par extension, ils prédirent également qu'au moins une partie des nombreuses inversions constatées sont causées par des collisions (astéroïdes ou comètes).

Cette idée a été confirmée depuis, puisque les quatre grandes familles de tectites correspondent toutes à une inversion du champ magnétique terrestre. Les tectites de Côte d'Ivoire (les *ivoirites*) sont associées avec le début de l'événement de Jaramillo qui date de 0,97 MA. Celles d'Europe centrale (les *moldavites*) et celles d'Amérique du Nord (les *bédiasites*) sont associées avec d'autres inversions datées respectivement de 14,8 MA et de 35 MA, âges qui correspondent à ceux des tectites (30). Il faut dire que pour les 35 derniers MA, on a mis en évidence 105 inversions (soit une moyenne de trois par million d'années), ce qui montre bien le caractère hautement instable du champ magnétique terrestre, et le fait que toutes ces inversions ne peuvent avoir une cause astronomique.

On sait qu'actuellement l'intensité du champ magnétique de notre planète est en constante diminution. Elle est tombée de 80 000 à 50 000 gammas (soit de 0,8 à 0,5 gauss) depuis 2500 ans en Europe occidentale. Cette intensité décroît d'environ 1500 gammas par siècle, et on se dirige d'une façon apparemment irréversible vers une *annulation* qui deviendra effective dans quelques milliers d'années. Il n'est pas exclu que la lente diminution actuellement observée se transforme en un véritable *effondrement* en dessous d'une certaine intensité critique (quelques milliers de gammas peut-être). Cet effondrement entraînera aussi celui de l'ionosphère, couche atmosphérique enrichie en ions positifs et en électrons, qui exerce une influence très importante sur la propagation des ondes radioélectriques.

Il ne faut surtout pas mésestimer l'importance de ces inversions géomagnétiques, qui privent la Terre de son importante et efficace carapace naturelle qu'est la magnétosphère. Car tous les spécialistes savent bien que

durant les périodes d'annulation du champ magnétique, qui se produisent à l'occasion des inversions, d'importantes averses de rayons X, gamma et cosmiques atteignent la surface terrestre et les êtres vivants qui y vivent. Averses dont nous sommes protégés en temps ordinaire, et qui ne sont donc effectives que durant de très courtes périodes à l'échelle astronomique et géologique.

J'aurai donc à revenir sur cet intéressant sujet quand je parlerai des conséquences biologiques de l'impactisme, car il faut savoir que ces périodes d'annulation peuvent durer quelques milliers d'années, période largement suffisante pour faire des dégâts irréversibles. Car c'est alors que le fameux *impactisme particulière*, auquel certains ne veulent même pas croire, trouve le moyen de s'exprimer à sa manière, invisible certes mais terriblement efficace : c'est l'un des principaux responsables des mutations génétiques qui permettent une évolution de caractère catastrophiste.

Glissements et basculements des couches terrestres externes

Il s'agit d'un domaine très controversé parmi les géophysiciens, les géologues et les astronomes. Beaucoup n'y croient pas vraiment, faute de preuves indiscutables, d'autres les considèrent au contraire comme quasi certains. Jusqu'à récemment, il n'était question que de simples *glissements* de la croûte terrestre sur l'asthénosphère sous-jacente. Mais en 1996 une équipe de géophysiciens américains a créé une nouvelle surprise de taille : un authentique *basculement* de 90° autour du noyau se serait produit il y a plus de 500 MA.

Nous allons voir dans cette section ces deux scénarios différents dont on ne connaît pas d'exemple certain, ce qui n'a rien de vraiment surprenant dans la mesure où ces cataclysmes d'envergure sont rares à l'échelle humaine.

Les déplacements de la lithosphère terrestre

Au cours des années 1960, une grande théorie unificatrice, connue sous le nom de *tectonique des plaques* (31), est apparue dans l'éventail des théories scientifiques modernes et a totalement renouvelé l'ancien concept de *dérive des continents* (32). Les travaux d'Alfred Wegener (1880-1930), dans les années 1910, avaient montré de manière formelle que les continents se déplacent à l'échelle géologique, entraînant des variations appréciables dans la position des pôles géographiques. Les travaux modernes, d'un ampleur et d'un intérêt considérables, ont explicité la plupart des problèmes posés et ont permis à la géologie et à la géophysique de faire leur révolution.

Mais, même si la tectonique des plaques forme un tout cohérent, il serait illusoire de croire qu'elle a résolu *tous* les problèmes concernant les divers déplacements des couches externes de la Terre. Car, au très lent déplacement des plaques tectoniques (parfaitement explicité de nos jours),

dont le mouvement devient appréciable sur des périodes se chiffrant en millions d'années, il est probable que se superposent des mouvements de la lithosphère tout entière. Ces déplacements beaucoup plus rapides, puisque se chiffrant en dizaines ou centaines d'années au maximum, sont dus à une dérive globale de la lithosphère rigide (dont l'épaisseur mesure entre 70 km sous les océans et 150 km sous les continents) sur l'asthénosphère sous-jacente, couche plus plastique et plus chaude dont la viscosité augmente avec la profondeur.

Il ne faut pas confondre la lithosphère avec la seule croûte terrestre. Celle-ci a une double nature et ne concerne que la partie externe de la lithosphère. On distingue la croûte continentale qui est granitique et ancienne et dont l'épaisseur est d'une quarantaine de kilomètres et la croûte océanique, de composition basaltique beaucoup plus récente (moins de 200 MA), mais beaucoup moins épaisse puisque ne dépassant pas 7 km d'épaisseur. Ces deux types de croûte, bien distinctes, surmontent le manteau supérieur, encore plus dense, dont elles sont séparées par la discontinuité de Mohorovicic (connue des géophysiciens sous l'appellation simplifiée la *Moho*). Mais il ne faut pas perdre de vue que ce manteau supérieur fait encore partie de la lithosphère. La surface de découplage entre l'enveloppe externe rigide de la Terre (la lithosphère) et la couche sous-jacente plus plastique (l'asthénosphère) n'a rien à voir avec la *Moho*, elle est beaucoup plus profonde : environ 10 fois sous les océans et 4 fois sous les continents.

Il est inutile de préciser que l'épaisseur variable de la lithosphère (de 70 à 150 km) flottant sur une asthénosphère bosselée ne facilite pas ses déplacements globaux. Ceux-ci posent des problèmes importants, à tel point qu'ils sont niés par une grande partie des spécialistes des sciences de la Terre, qui pensent que la tectonique des plaques, telle qu'on l'a mise en évidence, explique d'une manière à peu près satisfaisante les migrations des pôles géographiques depuis 200 MA.

Il n'empêche que les calculs et certaines simulations ont montré que de tels déplacements sont possibles. Depuis longtemps déjà, cette dérive globale de la couche externe de la Terre a été soupçonnée à partir d'arguments nombreux, et elle mérite d'être étudiée plus à fond pour connaître ses causes, certainement multiples, et ses conséquences, toujours les mêmes, que l'on peut qualifier d'apocalyptiques.

A la fin des années 1950, dans son livre *Earth's shifting crust* (traduit en français sous le titre *Les mouvements de l'écorce terrestre*), le géologue américain Charles Hapgood (1904-1982) (33) a proposé une idée nouvelle qui, à l'époque (avant l'introduction de la théorie de la tectonique des plaques), a obtenu un bon accueil de certains scientifiques. Albert Einstein (1879-1955) lui même, qui a écrit la préface du livre d'Hapgood, considérait son idée comme " *vraiment remarquable et séduisante* ". Cette idée est en gros la suivante. Dans les régions polaires, il se forme en permanence un dépôt de glace qui a la particularité de ne pas se distribuer d'une façon symétrique autour du pôle. La rotation de la Terre agit sur cette masse

glacière *asymétrique* et met en action une force centrifuge qui augmente sans cesse et qui transmet une impulsion à la lithosphère sous-jacente. Quand elle atteint un degré limite, cette force centrifuge produit un déplacement de l'*écorce* terrestre (appellation utilisée par Hapgood et qui correspond bien à la lithosphère dans son ensemble et pas seulement à la croûte, qui est beaucoup moins épaisse), déplacement qui se répercute obligatoirement sur tout le globe et qui entraîne les régions polaires vers l'équateur. Cette hypothèse brillante a été confirmée par l'ingénieur américain Hugh Auchincloss Brown (1879-1975) dans son livre *Cataclysms of the Earth*, paru en 1967 (34).

Au début des années 1970, l'ingénieur autrichien Peter Kaiser (35) a confirmé la réalité de ces déplacements globaux et rapides de la lithosphère. Mais pour lui, les raisons de ces migrations polaires qu'il cherche à mettre en évidence et qui sont la conséquence obligatoire de toute dérive sont très différentes. Il les attribue principalement à des phénomènes hydrodynamiques à caractère tourbillonnaire ayant lieu dans le noyau, et qui seraient dus à la modification du champ magnétique terrestre. Ces mouvements, d'abord localisés dans ce noyau, gagnent progressivement les couches extérieures. L'ancrage de la lithosphère sur l'asthénosphère, malgré leur forme singulière, finit par devenir insuffisant pour s'opposer aux diverses forces horizontales qui s'exercent. L'écorce rigide se met alors à glisser et à dériver sur l'enveloppe plastique, en dépit d'innombrables contraintes qui font office de frein. Cette dérive globale s'arrête quand les forces horizontales redeviennent trop faibles, par suite du travail énorme qu'elles ont fourni lors du déplacement. Kaiser conclut que non seulement les déplacements globaux sont bien réels, en dépit de difficultés sérieuses, mais aussi qu'ils sont fréquents, très fréquents même à l'échelle géologique. Ses arguments, comme ceux de Hapgood, sont nombreux et plus ou moins convaincants.

Plusieurs autres hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène des déplacements rapides de l'écorce terrestre, parmi lesquelles celle de la collision avec un astéroïde. Cette hypothèse cosmique fut proposée, dès 1953, par Allan Kelly et Frank Dacheille (1917-1983) (36), deux scientifiques américains pionniers de la théorie de l'impactisme terrestre, quand il fut évident avec la reconnaissance des premiers astroblèmes au Canada, que la Terre a été souvent victime de collisions dans l'espace avec des objets cosmiques de bonne taille. Tenue pour marginale malgré tout pendant un quart de siècle, l'hypothèse cosmique de la dérive épisodique de la lithosphère est très logiquement réapparue comme une éventualité incontournable. Car, s'il est très probable que des déplacements globaux de l'écorce terrestre, entraînant des migrations des pôles géographiques et sans doute aussi magnétiques, peuvent être dus à des causes purement terrestres (comme celles préconisées par Hapgood et Kaiser), il n'est pas moins probable que d'autres déplacements doivent être consécutifs à des collisions importantes. Dans certains cas, en outre, les impacts d'EGA peuvent servir de force d'appoint, ou d'accélération d'un processus en cours, en fournissant l'énergie complémentaire nécessaire à ces déplacements.

Plusieurs auteurs ont émis l'idée que la dernière migration des pôles géographiques, due à un déplacement de l'écorce terrestre de courte durée, pourrait avoir eu lieu il y a seulement 12 000 ans et contribué à ce que certains appellent *l'Apocalypse de l'an -10000* (37). Cette date est une date charnière, d'importance majeure, dans l'histoire récente de la Terre et de l'humanité. Elle correspond à la fin de la dernière glaciation et au début de l'holocène, elle est contemporaine de cataclysmes plus ou moins obscurs comme la disparition de la dernière grande vague de mammouths et du changement rapide du climat de certaines régions.

Certains auteurs relient cette date clé à un hypothétique anéantissement de l'Atlantide de Platon. Car cette époque est aussi, du fait de l'amorce de la déglaciation, le point de départ de la montée relativement rapide des eaux océaniques. Celles-ci ont gagné plus de 150 mètres en 12 000 ans, entraînant l'engloutissement de plusieurs millions de kilomètres carrés de terres préalablement émergées et, par conséquence, des mouvements de population importants.

Je parlerai aux chapitres 18 et 19 de cette série de catastrophes qui a peut-être eu comme point de départ la collision de la fameuse *Clovis comet*, mise récemment en évidence par les scientifiques américains de plusieurs disciplines, ou moins probablement la collision d'un astéroïde de 600 mètres de diamètre qui a creusé le cratère alaskaien de Sithylemenkat, ou un impact océanique important, dû lui au possible impact d'un fragment de l'ancien centaure Hephaistos.

Mais restons ici dans les généralités concernant les possibles déplacements de l'écorce terrestre en tant que bloc unique. D'abord, il ne faut surtout pas confondre ce phénomène, qui ne concerne que la couche externe de la Terre (la lithosphère), avec le basculement complet de celle-ci, cataclysme d'une tout autre ampleur qui nécessiterait une énergie des milliards de fois plus considérable. Les calculs ont montré qu'un gros astéroïde de 200 km de diamètre ne serait pas capable de provoquer un changement dans l'axe de rotation de la Terre supérieur à 1 ou 2 degrés seulement.

Par contre, un tel astéroïde serait plus que suffisant pour provoquer un basculement complet (180°) de la lithosphère sur son substrat plastique qu'est l'asthénosphère. Je rappelle que ce déplacement global de l'écorce n'a rien à voir avec la dérive des plaques tectoniques qui sont entraînées dans des directions différentes les unes par rapport aux autres, cela au rythme de quelques centimètres par an, et qui finissent par disparaître dans les profondeurs de la Terre par l'intermédiaire des zones de subduction qui "ancrent" la lithosphère à l'intérieur de l'asthénosphère.

Les conséquences d'un déplacement de l'écorce terrestre, quelle que soit sa cause (qui peut être aussi bien terrestre que cosmique), sont évidemment multiples et importantes. Les principales sont des modifications dans les latitudes géographiques, et donc dans les climats, des effets de tension et d'étirement, ou au contraire de compression et de rétrécissement, du fait de

l'aplatissement du globe terrestre et de l'existence du bourrelet équatorial. Tous ces effets provoquent des fissures et des déchirements dans la lithosphère, accompagnés évidemment par un volcanisme sensiblement accru et des séismes très nombreux et très violents. De plus, les eaux des océans sont précipitées sur les continents, certains de ceux-ci sont submergés définitivement, d'autres sortent des fonds marins à la suite d'exhaussements isostatiques. C'est toute la géographie de la planète qui peut être bouleversée.

Quant à la faune et à la flore, elles subissent des répercussions de ces calamités naturelles tout à fait inhabituelles et certaines espèces sont amenées à disparaître ou à régresser, sans que l'on puisse pour autant parler obligatoirement d'*extinction massive* en rapport avec ce cataclysme progressif, et donc étalé dans le temps. Il peut y avoir probablement dérive de la lithosphère, sans qu'il y ait hiver nucléaire, et donc la vie n'est pas vraiment menacée. Elle souffre, mais doit pouvoir s'adapter.

On peut donc conclure en disant que les déplacements de la lithosphère terrestre, qui pourraient atteindre plus de 1000 km (Hapgood donnait 3200 km pour le dernier qui aurait conduit le pôle géographique de la baie d'Hudson en Amérique du Nord à son emplacement actuel, mais ce résultat semble vraiment excessif et en fait assez peu crédible), soit l'équivalent d'une dizaine de degrés en latitude, sont les cataclysmes globaux les plus importants et les plus meurtriers que peut encore connaître la Terre à l'époque actuelle.

Les basculements autour du noyau

Ce scénario a toujours été considéré comme étant de la science-fiction, compte tenu de l'énergie nécessaire pour permettre un basculement complet. Et pourtant, en 1996, le géophysicien américain Joseph Kirschvink et ses collègues du Caltech (Institut de technologie de Californie) ont annoncé qu'un tel basculement s'était déjà produit entre -535 et -520 MA, et qu'il aurait eu un rapport décisif avec l'explosion biologique du Cambrien (38). Ces chercheurs n'excluent d'ailleurs nullement que d'autres cataclysmes du même type se soient passés à plusieurs reprises tout au long de l'histoire géophysique de la Terre.

Kirschvink et ses collègues ont sondé la surface de notre planète afin de déterminer avec précision la position des pôles il y a 500 à 600 MA. Car pour eux et pour beaucoup d'autres géophysiciens, la tectonique des plaques n'explique que partiellement les migrations des continents connues depuis longtemps. Nombreux sont ceux qui supposent qu'à ce gigantesque ballet permanent, se superposent d'autres mouvements épisodiques globaux et plus rapides que ce déplacement des plaques qui ne dépasse pas quelques centimètres par an.

Outre les glissements de la croûte dont j'ai parlé plus haut, Kirschvink et son équipe ont postulé pour un véritable *basculement des couches externes*.

Encore fallait-il apporter, sinon des preuves indiscutables, tout au moins des arguments convaincants, susceptibles de vérification par d'autres équipes, et donc admissibles par la communauté scientifique. Ils ont proposé le scénario suivant qui, d'après eux, tient bien la route.

Un volcan titanesque surgi des entrailles du globe entre un pôle et l'équateur créerait une très sérieuse anomalie de masse, c'est-à-dire que la répartition des masses de part et d'autre de l'équateur ne serait plus suffisamment équilibrée pour perdurer. Sous l'effet de la force centrifuge, l'ensemble du globe pivoterait, de telle manière que le volcan géant se retrouve au niveau de l'équateur. En faisant basculer la Terre vers l'équateur, la force *tangentielle* restituerait l'équilibre provisoirement perdu. Contrairement au simple glissement lithosphérique, il s'agirait d'un basculement de l'ensemble des couches extérieures, à savoir la croûte (variable autour de 50 km) + le manteau supérieur (670 km) + le manteau inférieur (2230 km) qui représentent à eux trois les couches solides autour du noyau liquide et visqueux (2250 km) et de la graine centrale (1200 km). Ainsi les quelque 2950 km externes auraient tourné de 90° autour des 3450 km internes en 15 MA seulement, avec une vitesse de quelques dizaines de centimètres par an, peut-être dix fois supérieure à celle des plaques tectoniques.

Kirschvink et son équipe suggèrent que les actuelles Amérique du Sud, Afrique, Inde, Australie et Nouvelle-Zélande, qui allaient former le Gondwana, finissaient de s'assembler selon le processus ordinaire de la tectonique des plaques, en vigueur probablement depuis la fin de la différenciation du matériel constituant notre planète. Mais cet assemblage de continents aux formes antagonistes ne se serait pas passé en douceur (on s'en doute quand on voit la formation actuelle de l'Himalaya), et il aurait, au contraire, engendré d'importants cataclysmes, de confrontations de plaques en collision, au cours desquels une importante anomalie de masse serait progressivement apparue. Jusqu'au moment où, le point critique ayant été atteint, le fameux basculement de l'enveloppe solide sur l'enveloppe liquide se serait enclenché. Le Gondwana aurait pivoté de 90° autour de l'Australie.

L'équipe américaine, pour justifier ce scénario, s'est appuyée notamment sur des données paléomagnétiques précises. Ses membres ont effectué des prélèvements et des analyses sur plusieurs sites australiens (sur lesquels on trouve des sédiments datant du Cambrien et très bien conservés) et en Amérique du Nord.

Le résultat du cataclysme précambrien serait un mouvement général pour les anciennes terres émergées et un remodelage complet de la géographie terrestre. Ainsi l'Amérique du Nord et le Groenland seraient passés en seulement 15 MA de l'ancien pôle sud à l'équateur. Pour de nombreux géophysiciens "conservateurs", l'hypothèse de l'équipe du Caltech, qui en a surpris plus d'un il faut bien le dire, ne tient pas et n'est qu'une "interprétation possible" parmi d'autres.

Notons encore que compte tenu des dates retenues (535-520 MA) qui ne précèdent que de peu l'explosion biologique du Cambrien, les auteurs de l'hypothèse ont eu vite fait de faire le rapprochement et de lier les deux événements. Ils croient (à juste titre) que les diverses circulations océaniques sont très sensibles aux modifications de la position des continents. De très sérieux changements géophysiques et climatiques auraient profondément modifié les courants marins et empêché la création d'un écosystème vaste et homogène, peu propice à une diversité biologique. La multiplication d'écosystèmes locaux et régionaux auraient, au contraire, permis à la vie de se diversifier et de proliférer beaucoup plus rapidement qu'auparavant. Le basculement de la Terre aurait bel et bien débouché sur l'explosion du Cambrien.

Cette très intéressante hypothèse de Joseph Kirschwink permet de poser une nouvelle question clé, laissée de côté jusqu'à présent : " *Le basculement de la Terre, et non simplement un glissement de la croûte, est-il possible ?*". Les chercheurs qui ont présenté l'hypothèse en sont persuadés. Se pose donc la question annexe qui concerne les spécialistes des astéroïdes et des comètes : " *Est-ce qu'un très gros impact cosmique a pu aussi faire basculer la Terre au niveau du noyau et non plus de à celui de l'asthénosphère magmatique ?*".

On voit que l'équipe de géophysiciens américains a soulevé un sérieux lièvre, totalement imprévu car jugé jusqu'alors impossible par les scientifiques qui avaient travaillé sur la question. Surtout que la majorité des géophysiciens et des géologues ne croient déjà pas au possible glissement de la croûte sur l'asthénosphère, événement qui pourtant demande une énergie sensiblement inférieure. Et je n'ai pas parlé du chaos qui pourrait avoir aussi son mot à dire. Les scientifiques du XXI^e siècle ne s'ennuieront pas !

Notes

1. H. Termier et G. Termier, *Histoire de la Terre* (PUF, 1979).
2. A. de Cayeux, *La science de la Terre* (Bordas, 1969).
3. Huit planètes, et non pas neuf, car le système Pluton-Charon n'est pas en fait une vraie planète double, mais plutôt un système *hybride* composé de deux membres de la ceinture de Kuiper, de composition assez différente, qui se sont associés suite à un cataclysme cosmique dans lequel pourrait avoir été impliqué Triton, le gros satellite de Neptune. Deux autres petits satellites ont été découverts en 2011 faisant ainsi de Pluton un système quadruple. En 2006, Pluton a officiellement perdu son statut de planète principale, devenant une *planète naine*, statut aussi attribué à Cérès et Eris et par la suite à quelques autres objets de la ceinture de Kuiper.
4. J.-P. Poirier, *Le noyau de la Terre* (Flammarion, Dominos 110, 1996).
5. A. Cailleux, *Géologie générale. Terre-Lune-Planètes* (Masson, 1976).

6. E.R. Harrison, *Origin of the Pacific basin : a meteorite impact hypothesis*, Nature, 188, pp. 1064-1067, 1960.
7. V.S. Safronov, *Sizes of the largest bodies falling onto the planets during their formation*, Soviet Astronomy, 9, pp. 987-991, 1966.
8. A. Khalatbari, *Naissance de la Lune : le scénario express*, Ciel et Espace, 333, pp. 46-49, 1998.
9. J. Laskar, *La stabilité du Système solaire*, Pour la Science, HS 6, *Le chaos*, pp. 45-47, 1995.
10. J. Laskar, *La Lune et l'origine de l'homme*, Pour la Science, HS 6, *Le chaos*, pp. 48-54, 1995.
11. J. Laskar, *La Lune et l'origine de l'homme*, citation p. 52.
12. J. Laskar, *La Lune et l'origine de l'homme*, citation p. 54.
13. J'ai évoqué ces problèmes au chapitre 5, dans la section *Une formation agitée : la guerre des mondes*. Durant cette période, les planètes qui ont survécu se sont partiellement approprié la matière environnante et celle d'autres planètes déjà formées à l'occasion de collisions gigantesques qui ont eu des répercussions sur les éléments orbitaux, mais aussi physiques de la planète rescapée.
14. K. Mark, *Meteorite craters* (University of Arizona Press, 1987).
15. J.-C. Duplessy et P. Morel, *Gros temps sur la planète* (Odile Jacob, 1990).
16. F. Gassmann, *Effet de serre, modèles et réalités* (Georg, 1996). Titre original : *Was ist los mit dem treibhaus Erde* (1994).
17. Voir la note 6 de ce chapitre.
18. A. Berger, *Le climat de la Terre : un passé pour quel avenir ?* (De Boeck-Wesmael, 1992). Un grand classique pour comprendre le passé du climat terrestre.
19. E. Bernard, *Les bases énergétiques de la paléoclimatologie théorique et l'évolution des climats*, Ciel et Terre, 90, 6, pp. 413-454, 1974 ; 91, 1, pp. 41-74 ; 2, pp. 89-118 ; 3, pp. 161-219, 1975.
20. Texte de E. Bernard, extrait de l'article précédent.
21. M. Milankovic, *Canon of insolation and the ice-age problem* (Académie royale serbe, 1941). C'est le fameux article sur la théorie *astronomique* des climats.

22. R.J. Moyer and F. Dacheille, *Dust from large meteoritic impacts as an agent of climatic change*, *Meteoritics*, 12, 3, p. 321, 1977.
23. H. Stommel et E. Stommel, *L'année sans été (1816)*, *Pour la Science*, 22, pp. 46-52, 1979.
24. J.G. Hills and M.P. Goda, *The fragmentation of small asteroids in the atmosphere*, *Astronomical Journal*, 105, pp. 1114-1144, 1993.
25. G.L. Verschuur, *Impact. The threat of comets and asteroids* (Oxford Press, 1996).
26. Texte cité au chapitre 3, section " *Cuvier, catastrophiste et fixiste* ".
27. Cette information très intéressante, parue d'abord dans la revue *Nature* du 27 novembre 1997, sous la signature de F. Kyte et de nombreux coauteurs, a été répercutée dans les deux notes suivantes : 1. *An impact on the weather*, *Astronomy*, pp. 30-32, march 1998 ; 2. *Astéroïde et tsunami géant au Quaternaire*, *Ciel et Espace*, p. 11, février 1998.
28. B.P. Glass and B.C. Heezen, *Tektites and geomagnetic reversals*, *Nature*, 214, p. 372, 1967. Billy Glass était un jeune chercheur de 26 ans à l'époque où il a cosigné cet article avec Bruce Heezen, un mandarin américain de la géologie qui était son directeur. C'est lui qui a eu l'idée remarquable de lier les tectites et les inversions géomagnétiques. Cette hypothèse séduisante à première vue est cependant sérieusement remise en cause aujourd'hui, l'énergie dégagée par les impacts paraissant à beaucoup de géophysiciens nettement insuffisante pour inverser durablement le champ magnétique.
29. B.P. Glass, M.B. Swincki and P.A. Zwart, *Ivory coast and north American tektite strewnfiels : size, mass and correlation with geomagnetic reversals and other earth events*, *Proceedings of the tenth lunar and planetary science conference*, vol. 3 (planetary interiors and surfaces), pp. 2535-2545, 1979.
30. E.A. King, *Space geology, an introduction* (John Wiley & Sons, 1976).
31. *La dérive des continents. La tectonique des plaques* (ouvrage collectif) (Pour la Science, 1980).
32. M. Schwarzbach, *Wegener, le père de la dérive des continents* (Belin, 1985).
33. C. Hapgood, *Les mouvements de l'écorce terrestre* (Payot, 1962). Titre original : *Earth's shifting crust* (1958). Préface d'Albert Einstein et introduction à l'édition française de Yves Rocard. Ce livre contient une très importante bibliographie de près de 480 titres. Hapgood s'appuie sur des calculs du mathématicien James Campbell pour montrer que son hypothèse est tout à fait scientifique et donc plausible. Celui-ci a écrit le chapitre XI de

son livre, intitulé : *Le mécanisme des déplacements de Campbell* (pp. 272-299 de la version française).

34. H.A. Brown, *Cataclysms of the Earth*, Twaine Publishers, 1967.

35. P. Kaiser, *Le retour des glaciers* (Fayard, 1975). Titre original : *Die rückkehr der gletscher* (1971). Le mécanisme imaginé par l'ingénieur autrichien Peter Kaiser, totalement différent de celui de Hapgood, conduit étonnamment aux mêmes résultats.

36. A.O. Kelly and F. Dacheille, *Target : Earth (The role of large meteors in Earth science)*, 1953. Un livre écrit par deux pionniers américains de l'impactisme terrestre un peu oubliés aujourd'hui. La postérité est bien ingrate parfois avec certains précurseurs.

37. J.-L. Bernard, *Les archives de l'insolite* (Livre de poche, 1978).

38. O. Fèvre, *Le jour où la Terre a basculé*, Science et Vie Junior, pp. 22-25, novembre 1997.

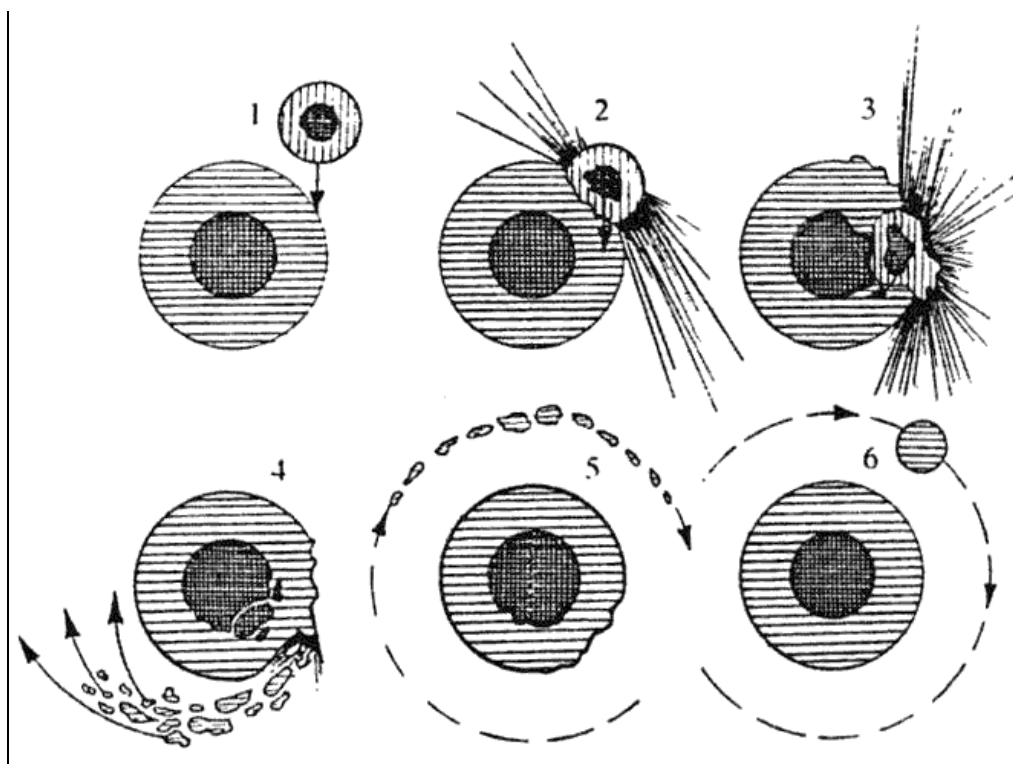


Figure 7. **Formation de la Lune**

Cette figure rappelle l'hypothèse de l'impact rasant en six étapes principales.

CHAPITRE 14

L'ORIGINE COSMIQUE DE LA VIE

La vie : du plus simple au plus complexe

L'organisation de la matière est intimement liée à l'histoire de l'Univers. A partir d'un chaos complet, lié au phénomène du Big Bang, cette matière a très progressivement "pris forme", *du plus simple au plus complexe*, irréversiblement. De la particule élémentaire aux molécules les plus sophistiquées, à travers "les laboratoires cosmiques de la vie" chers aux astrophysiciens, et à l'aide des quatre forces fondamentales (1) qui ont permis l'association de ces particules, tout cela dans un laps de temps d'une quinzaine de milliards d'années, indispensable pour arriver à la complexité que nous observons aujourd'hui, y compris et surtout celle de la vie, telle que définie par Hubert Reeves (2) :

" Aujourd'hui, à la lumière de nos connaissances scientifiques, on est tenté de redéfinir la vie comme *cette tendance mystérieuse et universelle de la matière à s'associer, à s'organiser, à se complexifier*. Les vies animales et végétales en sont à notre connaissance les phases les plus évoluées. Leur présence est tributaire des phases antérieures, nucléaires, atomiques, moléculaires. Cette tendance à s'organiser existe dès le début de l'univers. Elle s'exprime par ces "forces" qui s'exercent entre toutes les particules élémentaires. "

A cette définition de la vie par un astrophysicien, on peut ajouter celle des biologistes qui est d'une précision et d'une concision remarquables :

" Est vivante toute structure capable de s'organiser, d'assimiler et de transformer des éléments simples en *macromolécules* complexes, et capable de se reproduire à l'identique à elle-même. " (3)

Il paraît évident aujourd'hui que la vie est un phénomène général, universel, inéluctable, obligatoire, et même que *l'Univers est fait pour la vie* (4/5), puisque les constantes de la nature semblent avoir les valeurs juste nécessaires pour permettre la vie en général, et l'intelligence qui est la nôtre en particulier. Les physiciens ont compris qu'un simple changement, que l'on pourrait qualifier de minime, dans l'une de ces constantes de la nature aurait eu des conséquences inimaginables et que la vie aurait pu ne pas être en mesure d'apparaître, celle que nous connaissons étant en tout cas totalement exclue.

Mais les choses étant ce qu'elles sont, la vie terrestre existe et, tout le monde (sauf évidemment les créationnistes) l'admet, elle a été le résultat d'un très long processus évolutif. Comment cette vie est-elle apparue ? La question reste posée : origine *locale* ou *exogène* ? La réponse, on le sait aujourd'hui, peut être double : la Terre peut avoir *fabriqué sa propre vie* et aussi bien avoir *accueilli une vie externe formée ailleurs*. Les deux peuvent fort bien cohabiter et s'être associées dès le début pour accélérer un processus dont le démarrage semble quand même avoir été assez laborieux, du fait surtout des conditions environnementales (la fameuse guerre des mondes) très défavorables à une émergence sereine. On croit que la vie a dû s'y reprendre à plusieurs fois avant de s'imposer irrémédiablement sur notre planète.

La vie : un phénomène général dans l'Univers

Le problème de l'origine et de l'évolution de la vie a toujours passionné les savants (6/7). D'énormes progrès ont été réalisés depuis un siècle, sans que les détails ultimes soient résolus d'une manière définitive pour autant. Le seront-ils un jour d'ailleurs ? Il est déjà fort remarquable que l'on puisse débattre sur des événements qui remontent à des milliards d'années, alors que d'autres beaucoup plus récents nous resteront à jamais totalement indéchiffrables.

Plus personne pratiquement ne conteste la réalité d'une vie extraterrestre, les astrophysiciens et les exobiologistes ayant prouvé par la découverte de nombreuses molécules interstellaires que les "briques" nécessaires à la vie existent partout dans l'Univers.

Les étapes du Big Bang à la vie

Dans son livre *Les origines cosmiques de la vie* (8), l'astronome américain, d'origine belge, Armand Delsemme explique très en détail les diverses tribulations de la matière à partir du Big Bang, et il montre que la vie est une quasi-obligation résultant d'une complexification de la matière et de l'interférence de détours plus ou moins aléatoires. Une vingtaine d'étapes à partir du Big Bang, bien que d'importance et de durée inégale, semblent conduire inéluctablement à la vie. Delsemme note, en effet, que chacune des étapes vers la vie a toujours choisi *le chemin le plus facile* et celui qui avait le plus de chance de mener au succès. Il a écrit à ce sujet :

" Chaque étape vers la vie a toujours choisi le chemin le plus facile et celui qui avait la probabilité la plus grande de se réaliser. Par exemple, les premières molécules prébiotiques, comme l'eau, l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde, se sont formées partout dans l'espace interstellaire, au départ des atomes les plus abondants fabriqués au cœur des étoiles. " (9)

Dans un tableau de son livre, Delsemme indique d'une façon synthétique les conditions initiales, les processus cosmiques mis en œuvre et les "bifurcations" nécessaires qui s'enchaînent pour déboucher sur une

complexification de la matière à partir du Big Bang. On estime que les neuf premières étapes ont demandé 300 000 ans seulement, ce qui est tout à fait insignifiant à l'échelle de l'Univers. Il faut attendre la dixième étape pour la formation des galaxies et celle des amas de galaxies, et la onzième pour la formation des étoiles qui est postérieure pour les astrophysiciens.

Dès la phase "étoiles", durant les étapes 12, 13 et 14, il est certain que l'ensemencement de l'espace interstellaire put commencer, à travers deux mécanismes qui ont encore cours aujourd'hui : un processus explosif (novae et supernovae) et un vent stellaire quasi permanent. Les étoiles massives permirent un ensemencement en atomes lourds du milieu interstellaire. Les astrophysiciens ont calculé qu'un seul milliard d'années (sur les quinze qu'on attribue à l'Univers) après la formation de la Galaxie, la matière de toutes les étoiles dont la masse dépassait cinq masses solaires avait déjà réintégré l'espace interstellaire, suite aux explosions dont leurs progéniteurs avaient obligatoirement fait l'objet. On pense que près d'un demi-milliard d'étoiles (ce qui semble tout à fait considérable) subirent ce sort inéluctable résultant des lois incontournables de la physique.

Cet ensemencement, répété à chaque génération d'étoile massive, permit l'enrichissement progressif en carbone, oxygène et azote, mais aussi en éléments plus lourds et en métaux, de la matière cosmique disponible ensuite pour un nouveau cycle.

La quinzième étape est décisive pour l'installation ultérieure de la vie. Grâce à l'ionisation due aux ultraviolets des étoiles voisines et aux réactions chimiques ions-molécules dans les nuages galactiques, des molécules organiques apparaissent. C'est le démarrage de la chimie organique (basée sur le carbone) avec toute sa richesse et sa complexité. Dès la fin de la première génération d'étoiles, de telles molécules ont été présentes dans les immenses nuages regroupant la matière éjectée par les supernovae. C'est alors que la *complexification* joua pleinement son rôle permettant l'association de molécules plus complexes et l'apparition de molécules prébiotiques.

Il semble indéniable que la vie dans l'Univers a pu commencer très tôt, dans la mesure où certaines étoiles de la première génération ont eu une vie extrêmement courte (quelques millions d'années seulement pour les plus massives). Si l'on considère que l'Univers date de quinze milliards d'années et que les premières étoiles ont été formées au bout de quelques millions d'années, on comprend que les premiers essais de vie pourraient remonter à environ quatorze milliards d'années, quasiment dix milliards d'années avant la nôtre. Que d'essais, d'échecs, mais aussi de réussites, la vie a eu le temps de connaître durant une période aussi immense dans l'ensemble de l'Univers.

Si le niveau humain demande, en gros, quatre milliards d'années pour se mettre en place, on voit que certaines civilisations, issues des premières générations d'étoiles, ont eu le temps d'évoluer d'une manière inimaginable

pour nous. Mais il ne faut pas perdre de vue non plus que la vie n'est pas systématique, car certaines étoiles évoluent trop vite, sont doubles ou multiples, ou même parfois n'ont pas de planètes habitables, et alors l'évolution à très long terme est impossible. Même si, comme cela est probable, une vie primitive arrive à démarrer en fonction de circonstances favorables, elle ne peut être que provisoire et donc vouée à l'échec.

Delsemme place comme terme de sa dix-septième étape, la formation des comètes qui, pour lui, ont eu une importance décisive pour l'apparition de la vie terrestre, la création des biosphères étant réalisée à la fin de la dix-huitième étape. L'eau liquide est la condition initiale de la dix-neuvième étape qui débouche sur l'apparition de la vie proprement dite, tout au moins la vie telle que nous la connaissons, basée sur la chimie du carbone.

Pour Delsemme et d'autres chercheurs spécialistes du sujet, il semble probable que l'eau des océans et la grande partie de l'atmosphère terrestre ont été apportées par des comètes qui ont heurté notre planète en très grand nombre durant toute la période d'accrétion et celle de la formation de la croûte qui a duré 500 MA environ. Cette période a été cruciale et elle aurait permis l'insémination massive de *molécules prébiotiques* préexistantes dans la matière cométaire et issues de la matière présolaire.

Les molécules interstellaires, le creuset de la vie

Il me faut revenir un peu en arrière pour bien expliquer comment la vie a pu se développer dans l'Univers. Le développement de la radio-astronomie a permis, à partir de 1937 (avec le radical CH, appelé méthylidine), la découverte d'une centaine de molécules organiques (qui contiennent du carbone) et inorganiques (qui n'en contiennent pas), allant de deux à treize atomes (HC_{11}N), dans les nuages interstellaires (10). On a repéré notamment la signature de l'eau (H_2O) et de l'ammoniac (NH_3), tous les deux en 1968, et plus récemment de nombreuses autres molécules organiques importantes dans l'optique de la vie. En particulier, le formaldéhyde (H_2CO), découvert en 1976, qui est l'unité moléculaire fondamentale à partir de laquelle les sucres et les polysaccharides ont dû se former.

Ainsi, s'est mise en place progressivement une nouvelle spécialité, la cosmochimie, qui associe astronomes, chimistes et même biologistes, et qui est appelée à un grand avenir puisque son but principal est d'étudier les origines de la vie dans l'Univers.

En 1996, un nouveau pas très important a été franchi grâce à l'astronome américain Thomas Geballe et au chimiste d'origine japonaise Takeshi Oka (11). Ces deux chercheurs ont réussi à identifier l'ion H_3^+ dans deux nuages interstellaires, ion qui a la particularité très remarquable de contrôler la chimie du cosmos et qui permet de fabriquer de *l'eau et d'autres molécules complexes* dans le milieu interstellaire. Cet ion H_3^+ est simple (il est composé de trois atomes d'hydrogène auquel il manque un électron), relativement stable et réactif et s'associe facilement avec d'autres éléments primordiaux

comme l'oxygène, le carbone et l'azote, en dépit de la très basse température et de la faible densité des nuages interstellaires.

L'ion H_3^+ est donc à l'origine de réactions chimiques qui fabriquent des *molécules organiques*, la matière première du vivant, qui existent en grande quantité dans le milieu interstellaire, et sa découverte est un nouvel argument important concernant l'existence de la vie *partout* dans l'Univers. Une vie qui se crée *en permanence*, qui peut prendre des voies différentes selon les "briques" utilisées, et qui a toujours bénéficié du *facteur temps*, élément essentiel et qui est hors de l'entendement humain (notre échelle est l'année ou le siècle).

Les astrophysiciens se sont demandé pourquoi l'espace, que l'on croyait auparavant hostile aux composés organiques tolère-t-il toutes ces molécules interstellaires et ne les détruit-il pas. L'explication la plus plausible est l'existence de poussières dans les nuages interstellaires, sous la forme de grains de silice et de graphite, dont le diamètre est de l'ordre de 1/10 000 de millimètre. Ces poussières préservent les molécules de la destruction en interceptant la majeure partie du rayonnement ultraviolet originaire des étoiles voisines. Sans la présence de ces minuscules poussières, il est probable que ces ultraviolets (très énergétiques) *dissocieraient* les molécules organiques.

Une vie plus ancienne et plus intelligente

On peut donc dire aujourd'hui que la vie dans l'Univers grouille, autant (à son échelle bien sûr, qui est très différente de la nôtre) que la vie terrestre. Quelle leçon et quelles perspectives pour l'avenir !

Notre vie terrestre étant relativement récente (à l'échelle astronomique), il est certain qu'une vie plus complexe existe ailleurs, une vie plus intelligente, qui a pu, et qui peut encore, influencer à son tour sur le cours des événements à un niveau que l'on peut qualifier de stellaire, comme nous en verrons un aspect à la fin de ce chapitre avec l'hypothèse de Francis Crick (1916-2004) sur la *panspermie dirigée*. Nous sommes peut-être le résultat d'une vie importée, remaniée sans cesse, améliorée à long terme, par le double jeu de l'évolution. Ce double jeu complémentaire c'est une évolution darwinienne, *gradualiste* (avec toute une série de petites modifications régulières et lentes), à laquelle se superpose une évolution *catastrophiste* (entraînant des macromutations) liée aux innombrables cataclysmes cosmiques et terrestres qui viennent brouiller d'une manière totalement aléatoire le cours paisible (paisible seulement à l'échelle humaine) de la montée inéluctable vers la complexité.

Il reste bien sûr une question clé que se posent les scientifiques et les philosophes, et que se pose également Armand Delsemme dans son livre : *Quelle est la signification et le dessein de l'Univers et de la vie ?* On ne peut répondre évidemment à une telle question qui rejoint la métaphysique, comme nous l'avons déjà expliqué.

L'origine terrestre de la vie

Le problème de l'apparition de la vie sur Terre est loin d'être résolu dans le détail (12). D'autant plus que la réponse peut très bien être double : la vie peut venir du cosmos, elle peut aussi être générée par notre planète. Très longtemps, les biochimistes ont d'ailleurs cru que la seconde alternative était la seule possible, ou tout au moins la seule crédible.

Avant de voir en détail dans la section suivante les différentes hypothèses cosmiques possibles, il faut d'abord étudier l'hypothèse classique, et toujours privilégiée dans les milieux conservateurs, celle de l'origine terrestre de la vie. Il s'agit d'une hypothèse très acceptable et toujours crédible, mais qui souffre maintenant de la concurrence avec sa rivale extraterrestre, du fait surtout de son géocentrisme. Cette théorie a été peaufinée par plusieurs générations de spécialistes, chacune d'elles apportant des améliorations considérables dans un domaine ou dans un autre.

Parmi les grands noms, il est obligatoire de citer les deux premiers qui ont lancé la recherche sur ses rails actuels. Ce sont le biochimiste russe Alexandre Oparine (1894-1980) et le biologiste anglais John Haldane (1892-1964) qui reconnurent dans les années 1920 que la vie doit avoir un ancêtre chimique inorganique et qui introduisirent la notion d'atmosphère primitive réductrice ne contenant pas d'oxygène. Ces découvertes fondamentales, faites par deux chercheurs qui ignoraient chacun le travail de l'autre, allaient permettre d'appréhender et de comprendre notre lointain passé biologique et l'extrême complexité de l'évolution pour passer de la bactérie à l'homme.

En ce qui concerne la vie sur la Terre, on sait une chose : elle existait déjà, sous une forme évidemment très primitive, au précambrien inférieur (13/14). Les plus anciens êtres vivants connus ont été découverts dans des sédiments datés de 3,4 milliards d'années environ. Mais rien ne prouve que la vie n'est pas apparue avant, et, en général, les spécialistes du sujet admettent comme date pour la création ou l'insémination de la vie sur la Terre 4 milliards d'années avant notre ère. Je rappelle que cette date est aussi celle donnée pour la consolidation définitive de la croûte terrestre.

L'atmosphère primitive de la Terre

On sait d'une manière définitive que la Terre s'est formée à partir d'un nuage de poussières et de gaz, il y a en gros 4600 MA. Durant au moins 500 MA, la croûte se forma et se solidifia progressivement, il n'y avait alors pas d'atmosphère et pas de vie possible. Peu à peu, au cours de la condensation de la matière terrestre, les gaz les plus légers et les plus abondants, l'hydrogène et l'hélium, quittèrent la croûte et s'échappèrent dans l'espace par suite de leur faible masse atomique. Ce fut également le cas des autres produits les plus volatils. Les océans et l'atmosphère primitive proviennent de gaz chassés de l'intérieur même de notre planète.

Au début du Précambrien inférieur, il y a 4000 MA, l'atmosphère était alors très différente de ce qu'elle est aujourd'hui, elle était réductrice, composée principalement de méthane, d'ammoniac et d'hydrogène, mais aussi d'eau, de dioxyde de carbone et d'azote. Elle était constamment irradiée par le Soleil (notamment les ultraviolets) et perturbée par de violents orages liés à l'activité volcanique intense.

Petit à petit, entre -4000 et -2000 MA (soit en 2 milliards d'années), des changements de composition de l'atmosphère se firent sentir, conditionnant l'évolution de la vie. Après avoir été fortement réductrice, l'atmosphère devint peu à peu oxygénée. On croit qu'à l'ère primaire (vers -600 MA), la teneur en oxygène de l'atmosphère atteignait 1/10 de l'actuelle et que c'est seulement au Silurien, vers -500 MA qu'elle atteignit la valeur actuelle, avec une couche d'ozone dans la haute atmosphère très utile pour arrêter enfin les rayons ultraviolets qui jusqu'alors frappaient la Terre sans retenue.

La "soupe prébiotique" et le démarrage de la vie

C'est dans ce contexte d'atmosphère réductrice et de catastrophisme volcanique et atmosphérique permanent qu'advint l'évolution chimique initiale qui allait conduire à l'apparition de la vie terrestre. Les constituants de l'atmosphère pouvaient se combiner entre eux et former ainsi des molécules intermédiaires plus complexes et actives, lesquelles dissoutes dans les lacs, les lagunes et les océans, pouvaient réagir et donner naissance à des molécules organiques : les acides aminés et les sucres. C'est l'époque de la célèbre "*soupe prébiotique*" (encore appelée "le bouillon primitif") imaginée par Oparine et Haldane à la fin des années 1920, et popularisée en 1953 par le chimiste américain Stanley Miller (1930-2007) et sa fameuse expérience (15), qui marquait les débuts de la chimie prébiotique, et prouvait surtout que des composés biochimiques ont pu se former en grande quantité dans une atmosphère réductrice soumise à des décharges électriques.

Dans les années qui suivirent, de nombreuses recherches destinées à comprendre la chimie organique confrontée à une atmosphère réductrice furent entreprises. Presque tous les acides aminés naturels furent identifiés comme *produits* des synthèses prébiotiques entreprises. La conclusion est claire pour les biochimistes : plusieurs des vingt acides aminés naturels existaient en grand nombre sur la Terre primitive. D'autre part, certaines expériences complémentaires prouvèrent que la vie n'aurait pas pu s'installer dans une atmosphère de type actuel.

Ce résultat étonnant et important a poussé le biochimiste britannique Leslie Orgel (1927-2007) à écrire ceci :

" La situation peut sembler quelque peu paradoxale, puisque toutes les formes supérieures de vie et la plupart des autres dépendent totalement de l'oxygène. Seuls quelques types de bactéries et certains autres micro-organismes sont capables de subsister dans les conditions qui furent nécessaires à l'origine

de la vie. Voilà un exemple frappant d'adaptation. La plupart des organismes ont, sans doute, commencé à utiliser l'oxygène lorsqu'il fut abondant, puis, au bout d'un certain temps, ils en sont devenus totalement dépendants. Actuellement, ils ne peuvent plus subsister dans un environnement dépourvu d'oxygène. " (16)

Cette atmosphère réductrice a été, semble-t-il, un allié puissant pour l'apparition de la vie, et les choses se sont passées rapidement à l'échelle astronomique. Comme l'a noté Stephen Jay Gould (1941-2002), qui fut à la fois professeur de biologie, de géologie et d'histoire des sciences à l'Université de Harvard, et donc bien placé pour faire la synthèse des événements :

" La vie est apparue très vite sur la Terre, aussi vite que possible : la vie était inéluctable ou, du moins, prévisible, à partir des constituants chimiques présents dans l'atmosphère et dans l'océan originels...

Pour des raisons liées à la chimie de l'origine de la vie et à la physique de l'auto-organisation, les premières "choses" vivantes sont apparues à la limite strictement inférieure de la complexité, la complexité la plus élémentaire. " (17)

C'est ensuite l'enchaînement de la complexité. Certaines de ces molécules se condensèrent pour former des polymères et des agrégats macromoléculaires. Je rappelle sommairement comment les biochimistes pensent que les choses se sont passées.

Les acides aminés, très nombreux dans les lacs et les lagunes, se groupèrent pour former des gouttelettes appelées *coacervats*. Ce sont eux qui donnèrent ensuite des cellules vivantes élémentaires contenant de l'ADN, que l'on appelle des *coccoïdes*. C'est à partir de ces derniers que deux processus principaux d'évolution prirent forme durant tout le Précambrien :

1. Par évolution individuelle, un *coccoïde* donne soit des bactéries, soit des algues bleues, c'est-à-dire des procaryotes, micro-organismes constitués d'une cellule unique avec un ADN libre. Il n'y a pas d'évolution ultérieure, la cellule reste unique. Cette évolution minimale a survécu jusqu'à maintenant, de telle sorte que l'on retrouve des bactéries et des algues bleues identiques à ce qu'elles étaient il y a trois milliards d'années.

2. Dans le second processus, qui allait être le bon, plusieurs *coccoïdes* se regroupent dans un sphéroïde, à l'intérieur duquel chaque *coccoïde* de base évolue individuellement, pour son propre compte, les divers éléments constitutifs de l'ensemble formant finalement une cellule eucaryote. C'est cette cellule qui dès le début de l'ère primaire, dans une atmosphère de plus en plus proche de la nôtre, s'est littéralement imposée, se complexifiant sans cesse, pour finalement déboucher progressivement (le facteur temps est essentiel dans les problèmes d'évolution gradualiste) sur l'immense éventail

des animaux et végétaux eucaryotes passés et actuels, et donc sur un monde animal et végétal de plus en plus sophistiqué.

Je reparlerai de l'évolution au chapitre 15, mais cette fois sous un éclairage particulier, en l'occurrence ses rapports face à l'extinction, phénomène dont l'importance a été cruciale.

L'origine cosmique de la vie terrestre

J'ai expliqué plus haut que la vie est une généralité dans l'Univers. Il reste à voir par quels processus elle a pu parvenir sur la Terre. Trois scénarios sont possibles : le premier met en scène les météorites, le deuxième les comètes et le troisième la traversée d'un nuage de molécules organiques. Mais auparavant je vais dire quelques mots de cette remarquable hypothèse qu'est *la panspermie*, liée à la découverte des premières météorites carbonées étudiées par les chimistes, hypothèse envisagée dès l'Antiquité et reprise au milieu du XIX^e siècle par quelques savants fort perspicaces et en avance sur leur temps.

La théorie de la panspermie

Comme de nombreuses idées qui reviennent seulement à la mode de nos jours, après avoir été totalement abandonnées et considérées souvent comme stupides, celle de la panspermie est loin d'être nouvelle. Dès l'Antiquité, plusieurs philosophes croyaient déjà que certaines formes de vie peuvent venir du cosmos. Le poète latin Lucrèce (98-55), notamment, était partisan de cette hypothèse. Dans son livre *De la nature* (*De natura rerum* en latin) (18), épopée inspirée de la science et de la philosophie épicuriennes, il a écrit :

" Nous sommes tous nés d'une semence venue du ciel ".

On ne peut qu'admirer la prescience de Lucrèce, persuadé que la pluralité des mondes était une réalité, une obligation même. Convaincu de la toute puissante de la Nature, il croyait que celle-ci en avait créé une infinité d'autres que la Terre et les planètes, et que par l'intermédiaire des atomes, ils communiquaient à travers le temps et l'espace.

Il fallut attendre le XIX^e siècle pour que l'hypothèse de l'origine extérieure pour la vie terrestre refasse surface. Ce n'est pas un hasard. C'est l'époque où, à nouveau, les savants se posent la question : " *D'où vient la vie ?* ". On sait alors que des pierres tombent sur la Terre et les chimistes les étudient avec attention, surtout celles qu'on appelle "charbonneuses" à l'époque (et qui sont nos météorites carbonées d'aujourd'hui).

Le 15 mars 1806, l'année même où Biot publia son rapport sur la chute de L'Aigle, deux pierres de 4 et 2 kg tombèrent à Alès (à l'époque on écrivait Alais) dans le Gard, qui s'avèrent être des météorites carbonées. Elles furent examinées en détail en 1834 par le chimiste suédois Jöns Berzelius

(1779-1848), l'un des créateurs de la chimie moderne. Avec étonnement, il mit en évidence la présence d'eau et nota aussi que la substance de la météorite ressemblait à de la matière organique, quelque chose qui a été vivant.

Le 14 mai 1864, une vingtaine de pierres (20 kg au total) tombèrent sur Orgueil, un petit village du Tarn-et-Garonne proche de Montauban. Elles se révélèrent assez extraordinaires (19/20) avec la présence incontestable de matières carbonées d'origine organique. Elles furent étudiées rapidement par plusieurs personnalités de l'époque et notamment par Marcellin Berthelot (1827-1907), l'un des créateurs de la chimie organique, qui arriva aux mêmes conclusions que Berzelius. Dès cette époque, le doute s'installa avec la constatation que les météorites carbonées pouvaient contenir de la matière vivante. On avait ainsi la quasi-certitude que *la vie existait ailleurs*, hypothèse excitante, et qu'avec ces météorites c'étaient les *vestiges d'une autre vie* qui nous arrivaient sur la Terre. L'autre question qui vint tout de suite à l'esprit fut celle-ci : "*Et si la vie terrestre venait du cosmos via les météorites ?*".

Au début du XX^e siècle, le chimiste suédois Svante Arrhenius (1859-1927) alla plus loin, confirmant que la vie pourrait bien avoir eu une origine extérieure à la Terre et qu'elle pourrait avoir été introduite sur notre planète à partir d'un autre corps céleste. C'est la fameuse théorie de la panspermie (du mot grec *panspermia*, mélange de semences). Selon Arrhenius, les organismes vivants, formés ailleurs, auraient pu effectuer un long voyage interplanétaire, ou même peut-être interstellaire, sous la forme d'une spore bactérienne véhiculée par la poussée des radiations. Il calcula que des spores auraient pu venir de la région de l'étoile voisine alpha du Centaure (située à 4,35 années lumière) en 9000 ans seulement.

Il est apparu que cette hypothèse, présentée sous cette forme un peu simpliste, ne tenait pas, du fait de la quantité trop importante de radiations que recevrait cette spore durant son long voyage dans l'espace. Ces radiations disloqueraient tout matériel organisé, constitué de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène.

Cependant, sous une forme approchée, c'est-à-dire le voyage d'organismes vivants à l'intérieur de météorites ou de comètes, la théorie de la panspermie est beaucoup plus acceptable, pratiquement impossible à réfuter, même si cela ne signifie en aucune façon que la vie sur Terre est réellement apparue ainsi. En effet, une cellule vivante enfermée dans une météorite ou une comète pourrait fort bien supporter un long voyage interstellaire, ou un long séjour dans le Système solaire, car elle se trouve à l'abri des radiations et la basse température de l'espace empêche une détérioration chimique spontanée.

Plusieurs versions modernes de la panspermie ont été proposées. Elles sont argumentées et assez convaincantes. Comme Berzelius et Berthelot le pensaient déjà, les météorites carbonées sont bien un véhicule du transfert

de la vie d'un système à un autre, d'une époque à une autre. La version cométaire, proposée en 1978 par le tandem britannique Fred Hoyle et Chandra Wickramasinghe, concerne l'ensemencement de la Terre par des poussières interstellaires véhiculées par des noyaux cométaires.

Les météorites

Depuis les chutes de météorites carbonées d'Alès et d'Orgueil (la France était le paradis des météorites avant d'être remplacée par l'Antarctique !), de nombreuses autres ont eu lieu, certaines s'avérant exceptionnellement intéressantes, notamment les deux chutes de 1969 (l'année miraculeuse) d'Allende et de Murchison. Les météorites des deux types les plus primitifs, CI et CM, sont particulièrement intéressantes, car elles contiennent de 2 à 5 % de carbone et de 5 à 20 % d'eau. Comme nous l'avons vu avec celles d'Alès et d'Orgueil, elles ont dès le XIX^e siècle attiré l'attention des spécialistes, surtout par le fait que le carbone se présente partiellement sous la forme de composés organiques.

Mais il s'est longtemps posé un problème de contamination terrestre, ce qui fait qu'aucun résultat d'analyses concernant des météorites "anciennes" n'a pu être accepté sans de sérieuses réserves avant l'époque actuelle qui permet de faire des études extraordinairement sophistiquées. Les chondrites carbonées sont perméables à l'eau et captent donc rapidement des composés organiques terrestres, tels les acides aminés du sol. On conçoit donc le doute qu'entraînent des résultats d'analyses positifs concernant la vie extraterrestre décelée dans les météorites terrestres.

La chute d'une grosse météorite carbonée, de type CM, le 28 septembre 1969, dans une région aride près de Murchison en Australie, fut donc une véritable aubaine pour les spécialistes, un cadeau du ciel comme certains météoriciens l'ont dit. Un maximum de précautions furent prises pour éviter toute contamination terrestre. Des analyses chimiques, d'une précision toujours plus fine, qui se sont succédé pendant un quart de siècle, ont confirmé la présence de composés organiques et de grandes quantités d'acides aminés.

Les acides aminés ont la curieuse particularité d'exister sous deux formes symétriques : les acides lévogyres (notés L) et les acides dextrogyres (notés D). Ces deux formes sont identiques mais ne sont pas superposables, la première faisant tourner le plan de la lumière polarisée vers la gauche, l'autre vers la droite. La biologie terrestre ne reconnaît que les acides lévogyres, ce qui pousse les biologistes à dire que la nature a choisi la gauche.

Or, sur près de 90 acides aminés différents, ce qui est considérable, repérés et étudiés dans la météorite de Murchison, seulement une vingtaine existent sur la Terre. *Les 70 autres sont d'origine extraterrestre.* Cela est une preuve quasi irréfutable de l'introduction de matériel prébiotique en permanence sur la Terre, et cela dès la formation du Système solaire.

Ces observations ont été confirmées pour d'autres météorites carbonées contenant, elles aussi, des acides aminés particuliers, notamment celles de Murray (Kentucky) de type CM, et surtout, bien sûr, celle de Allende (Mexique), de type CV (un type moins primitif), tombée la même année (le 8 février) que celle de Murchison, et qui est aujourd'hui considérée comme la météorite connue la plus importante pour la science, d'autant plus que l'on a pu en récupérer plus de deux tonnes. Les anomalies isotopiques relevées dans certaines inclusions de cette météorite ont prouvé que plusieurs de ses composants sont antérieurs à la formation de la nébuleuse solaire et ont été créés lors de l'explosion d'une supernova voisine. Les spécialistes ont entre les mains un matériau qui remonte à une génération antérieure d'étoile. Une chance inouïe. La météorite d'Allende a été baptisée "la nouvelle pierre de Rosette" car, comme sa réplique archéologique, elle permet un plongeon dans un temps passé que l'on croyait à jamais inaccessible.

Toutes les informations disponibles aujourd'hui indiquent clairement que des substances chimiques prébiotiques se forment ailleurs que sur la Terre. A toutes les étapes de la formation de notre planète et de son développement ultérieur, une quantité de matière carbonée, qui dépasse l'imagination la plus débridée, souvent d'origine présolaire, est entrée en collision avec les continents et les océans. Cette matière très fragile s'est rapidement dispersée sous forme de poussière pour se mélanger aux matériaux terrestres. Les acides aminés venus d'ailleurs ont fort bien pu s'associer à d'autres éléments terrestres prébiotiques pour former les premiers êtres vivants.

Ainsi, aujourd'hui, l'origine extraterrestre de la vie est devenue une probabilité qu'il est obligatoire de prendre en compte. *Les météorites sont un vecteur possible de transfert et de transport de la vie à travers les étendues interstellaires.* D'un autre côté, la vie a pu avoir une origine terrestre. Il ne serait pas surprenant que la vérité soit intermédiaire : la vie terrestre pourrait fort bien être une vie mixte, mi-terrestre, mi-cosmique.

Avant de laisser les météorites carbonées, je rappelle qu'elles sont souvent apparentées aux astéroïdes carbonés de types C et D, eux même considérés comme pouvant être, dans certains cas, des vestiges de noyaux de comètes éteintes, disloquées par fragmentation ou même seulement par émiettement. Elles sont liées également à une partie de la poussière cosmique que la Terre attire en permanence à l'occasion de sa révolution autour du Soleil. Je reparlerai de ce problème au chapitre 16 intitulé "*La vie et la mort viennent du cosmos*".

L'hypothèse cométaire

La parution, en 1978, du livre de Fred Hoyle (1915-2001) et de Chandra Wickramasinghe, *Lifecloud*, paru en français sous le titre *Le nuage de la vie* (21), fit l'effet d'une bombe dans les milieux scientifiques.

Dès leur introduction, ils annonçaient clairement la couleur :

" Nous affirmerons que le nuage de gaz et de poussière interstellaire au sein duquel naquit notre système solaire a continué de rapporter des biomolécules longtemps après que se fut achevée la phase initiale à haute température de la nébuleuse solaire et de la matière planétaire. De tels apports de biomolécules fournirent les "briques" qui permirent l'émergence de formes encore plus complexes, formes qui se transformèrent par la suite pour devenir les premières cellules vivantes.

Le site propice à l'association des biomolécules en formes plus complexes fera l'objet d'un débat. La Terre constituait un site possible, mais elle semble moins favorable que la multitude de corps planétaires de la taille des comètes qui ont dû exister durant les quelques premières centaines de millions d'années de l'histoire de notre système solaire. Il est également très probable que la Terre ait tiré tous les matériaux plus ou moins volatils contenus dans l'atmosphère et les océans de corps planétaires de ce genre. Nous pensons que la vie arriva finalement sur la Terre comme une pluie de cellules déjà vivantes, originaires des corps de type cométaire. "

Ces deux auteurs bien connus démontraient dans *Lifecloud*, avec de nombreux arguments convaincants, que la vie a trouvé son origine dans l'espace et que la vie terrestre est une vie importée. Les premiers, ils reprenaient dans une version (très) modernisée la théorie de la panspermie d'Arrhénius, préconisant que la Terre a été fertilisée dès les premiers moments de sa formation par des noyaux de type cométaire contenant des organismes primitifs vivants. Ces cellules vivantes (en fait des molécules biochimiques) seraient issues du nuage de poussières interstellaires, à partir duquel le Soleil, la Terre et les autres planètes se sont formés il y a 4,6 milliards d'années. Cela veut dire que les éléments vivants ont été à l'origine ensemencés sur toutes les planètes du Système solaire, mais apparemment seule la Terre a réussi d'une façon certaine à conserver cette vie, qui n'a jamais pu se développer ou qui a abandonné (ce serait le cas de Mars), pour des raisons diverses et complexes, les planètes voisines.

Pour Hoyle et Wickramasinghe, certains grains interstellaires sont vivants. Il s'agirait tout simplement de bactéries recouvertes d'un mince film de carbone (sous forme de carbynes) pour les protéger des effets destructeurs des ultraviolets issus des étoiles. Les queues cométaires servent donc d'agents de dispersion de ces bactéries.

Depuis la parution de *Lifecloud*, de nombreux autres auteurs ont repris l'idée de cette vie terrestre importée, notamment Armand Delsemme dans son livre *Les origines cosmiques de la vie* paru en 1994, seize ans plus tard. En fait, il apparaît clairement aujourd'hui à de nombreux experts (22) que les comètes sont bien le meilleur support connu pour le transfert et le transport de la vie d'un système planétaire à un autre. Formées dans les marges externes de la nébuleuse présolaire, à partir de glace et de roches diverses, et parquées

depuis plus de quatre milliards d'années dans le nuage de Oort, elles peuvent garder pendant des milliards d'années leurs caractéristiques chimiques et leur intégrité.

A partir des années 1970, chaque belle comète a été étudiée en grand détail, et de très nombreuses molécules mères et filles (produits de dissociation) ont été repérées, aussi bien dans le noyau, la chevelure ou la queue. On s'est rendu compte que les comètes renferment une importante fraction de matière carbonée. En 1986, à l'occasion du retour de P/Halley, les sondes spatiales ont trouvé 30 % de matière organique dans le noyau contenant des atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N). Pour cette raison, on a appelé la matière organique des comètes les "CHON". Quelle est leur nature exacte ? Les "poussières" cométaires se sont avérées contenir des grains de métal ou de graphite de la taille du micromètre, des poussières de roche (silicates de magnésium), des polysaccharides et des polymères organiques apparentés. La présence de ces éléments primordiaux, ajoutée à celle de l'eau (sous une forme gelée) suggère que des réactions prébiotiques peuvent avoir lieu dans les comètes malgré les basses températures auxquelles elles sont d'ordinaire confrontées.

Nous avons vu dans le chapitre consacré aux comètes, comment à partir d'une orbite entièrement située dans le nuage de Oort, certaines d'entre elles, suite à des perturbations stellaires (principalement le passage d'étoiles à 1 ou 2 UA du Soleil), quittaient leur orbite initiale pour "plonger" dans le Système solaire intérieur où leur vie en tant qu'astre actif était comptée. Une orbite plus courte et plus excentrique, un dégazage inéluctable qui élimine progressivement toutes les glaces et composants volatils, et une fin de vie active en quelques millions d'années au maximum sont la règle. Ces comètes peuvent survivre ensuite en tant qu'astéroïdes principalement carbonés (types C et D). Et leurs ultimes fragments peuvent heurter la Terre sous forme de météorites carbonées, surtout de types CI et CM. A moins bien sûr que ces comètes subissent un impact direct sur une planète, comme la fameuse comète *Shoemaker-Levy 9* de 1994 qui a peut-êtreensemencé Jupiter de molécules prébiotiques ou vivantes en plusieurs endroits de son atmosphère externe.

La théorie de Hoyle, Wickramasinghe, Delsemme et d'autres, chaque année plus nombreux, tient particulièrement bien la route. De nombreux chercheurs actuels considèrent comme probables ses diverses implications (impacts sur *toutes* les planètes, ensemencement de molécules prébiotiques partout). Mais il est bien clair que cette vie n'a pas pu se développer ou se maintenir sur toutes les planètes. Vénus et Mercure n'en ont probablement jamais eu, Mars en a eu une mais n'a pas pu la garder à cause d'un impactisme macroscopique trop fréquent, Europe (le satellite de Jupiter) et surtout Titan (le satellite de Neptune) en ont probablement une, très différente de la nôtre.

La traversée d'un nuage de molécules organiques

On pense aujourd'hui que les immenses nuages dispersés entre les étoiles peuvent être également un possible support de propagation de la vie. J'en ai déjà parlé au chapitre 12, car certains chercheurs ont vu en ces nuages opaques l'une des causes possibles de la mort des dinosaures, ou tout au moins l'un des facteurs de l'extinction de masse d'il y a 65 MA.

Le Système solaire, au cours de son périple autour de la Galaxie (qu'il fait en 250 MA environ) pénètre parfois à l'intérieur de ces nuages, et cela pour plusieurs milliers d'années. Si ces nuages interstellaires contiennent des éléments prébiotiques, ou même carrément vivants dans certains cas, on ne voit pas pourquoi ceux-ci n'entreraient pas en collision avec la biosphère terrestre. Comme je l'ai expliqué tout au long de ce livre, l'impactisme n'est pas seulement macroscopique, il est aussi, et peut-être surtout, particulaire.

Lors de la traversée de ces nuages, la Terre peut être parfois littéralementensemencée par ce *nuage de la vie* qui peut, par contre, en d'autres occasions être aussi un véritable *nuage de mort*, comme je l'expliquerai au chapitre 16 consacré à ces questions.

Ces nuages de gaz et de poussières sont fréquents dans le ciel et ils apparaissent sur les clichés des astronomes sous forme de taches sombres sur le fond des champs d'étoiles. La lumière des étoiles est plus ou moins obscurcie lorsqu'elle traverse ces nuages de poussières. On pense, en général, que la masse des poussières pourrait représenter environ 2 % de la masse totale des nuages intersidéraux, ce qui ne paraît pas énorme par rapport à celle des gaz, estimée à 98 %. Mais 2 % d'une masse incommensurable, cela fait beaucoup, on s'en doute.

Quelle est la composition de la poussière interstellaire ? Elle est obligatoirement plurielle, mais certains résultats laissent à penser qu'une partie importante pourrait être constituée de carbone solide sous forme de graphite. De telles particules pourraient résister à de très fortes températures et servir de catalyseur pour la formation des molécules interstellaires, notamment l'hydrogène (H₂). Hoyle et Wickramasinghe pensent, eux, que la poussière interstellaire est en partie constituée de cellulose ou d'un polysaccharide apparenté, c'est-à-dire de molécules "géantes", qui peuvent au contact d'une atmosphère accueillante (comme l'atmosphère réductrice de la Terre il y a 4000 MA) participer à l'éclosion de la vie proprement dite.

Poussière cosmique et vie terrestre

J'ai déjà parlé au chapitre 10, consacré aux preuves de l'impactisme, des micrométéorites concernées par les trois hypothèses précédentes,

puisqu'elles sont issues soit de planètes ou de comètes désintégrées, mais également de la poussière interstellaire qui n'a jamais été intégrée à un corps de taille métrique, tout au moins en ce qui concerne notre génération d'étoile.

Ces micrométéorites, longtemps ignorées (et même méprisées, comme étant quantité négligeable), ont été totalement réhabilitées par les travaux de Michel Maurette et de ses associés (23/24). En effet, les éléments de base du vivant : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote (constituants des CHON) et aussi le soufre ont été identifiés de manière formelle dans la poussière cosmique recueillie dans les déserts de glace et donc merveilleusement préservée de toute pollution terrestre.

" De plus, les petites molécules prébiotiques, telles que l'acide cyanhydrique (HCN), le formaldéhyde (HCHO) et l'eau, existent partout dans l'espace interstellaire. La chimie de l'acide cyanhydrique dans l'eau conduit aisément aux acides aminés et aux bases azotées (puriques et pyrimidiques), et celle du formaldéhyde est une source de sucres biologiques. De là à leur imputer l'origine de la vie sur Terre, il n'y a qu'un pas. " (25)

Maurette a identifié également dans certains des échantillons, ramassés par milliers au cours de ses expéditions au Groenland et en Antarctique, des carbures aromatiques polycycliques (connus sous le sigle de PAH), dont certains n'ont jamais pu être mis en évidence dans les météorites elles-mêmes. Comme je l'ai dit au chapitre 10, le chimiste français André Brack (26) a conclu que les micrométéorites auraient agi comme de minuscules "réacteurs chimiques chondritiques". Elles auraient synthétisé des molécules organiques au cours de réactions chimiques catalysées induites par l'eau liquide ou même gazeuse.

C'est une nouveauté très intéressante : les micrométéorites ont été un élément incontournable de la chimie prébiotique, notamment quand elles se trouvaient en grand nombre au fond de l'océan, dans un environnement préservé, à proximité d'une source hydrothermale chaude, apte à favoriser la synthèse des molécules prébiotiques. Pour Maurette, cette association dans une *soupe primitive* new look aurait pu déboucher très rapidement (en dix ou vingt ans seulement, ce qui est quasiment instantané à l'échelle astronomique) à une vie *mixte*, base de la nôtre : *une vie terrestre d'origine cosmique*.

Ce scénario, bien argumenté, de Maurette et ses associés est facilement acceptable pour les astronomes qui connaissent l'origine de cette inépuisable matière cosmique, et qui savent qu'elle a été constamment enrichie au cours des milliards d'années antérieurs. Par contre, ce scénario est difficilement acceptable par d'autres scientifiques, notamment les paléontologues traditionnels, qui parlent de science-fiction. Si bien que les promoteurs de cette hypothèse cosmique (maintes fois proposée dans le passé et depuis constamment enrichie des découvertes modernes) doivent faire face, comme

toujours, à une coalition d'adversaires qui s'acharnent sur quelques inévitables points faibles (qui seront améliorables ces prochaines années), et qui ignorent sciemment ses côtés positifs.

L'hypothèse de Crick : la vie inséminée sur Terre

Francis Crick, le biologiste (et physicien) britannique, a été l'un des plus grands savants du XX^e siècle. On lui doit la découverte, en 1953, avec son confrère américain James Watson, de la structure en forme de double hélice de l'ADN (acide désoxyribonucléique), découverte révolutionnaire qui allait bouleverser toute notre compréhension du monde vivant. Mais Crick ne resta pas sur cet acquis et ses lauriers (le prix de Nobel de médecine et de physiologie 1962) et il publia en 1981 un livre remarquable, *Life itself* (paru en français sous le titre *La vie vient de l'espace*) (27), dans lequel il présentait une nouvelle hypothèse spectaculaire et innovante : *la vie terrestre a été inséminée* sur la Terre par une civilisation extraterrestre. C'est l'hypothèse de la *panspermie dirigée* sur laquelle il a travaillé, à partir de 1972, avec le biochimiste britannique Leslie Orgel.

Comme toutes les nouvelles hypothèses dérangeantes, celle de Crick a été raillée par toute une partie de la communauté scientifique conservatrice, ne voulant même pas prendre en compte l'envergure intellectuelle de son auteur et la puissance de son raisonnement. On retombe toujours dans un assez misérable géocentrisme, qui a la vie dure au niveau des idées.

L'hypothèse de Crick est-elle impossible ? Pas du tout, elle est seulement nouvelle et non assise sur des preuves (le sera-t-elle un jour ?). Au contraire, elle est stimulante et montre que l'homme, malgré ses indéniables progrès (à l'échelle humaine), reste et restera toujours un "rien cosmique" dans l'espace et dans le temps, comme le rappelle fort à propos Armand Delsemme. Le fait que, d'après Crick, la vie aurait pu êtreensemencée sciemment sur la Terre semble une éventualité plausible si l'on place la vie, et surtout la *conscience*, à un échelon largement supérieur à celui atteint par l'homme en à peine quelques dizaines de milliers d'années, depuis l'arrivée d'*Homo sapiens* comme créature principale du monde vivant.

D'après Crick et Orgel, la vie terrestre ne serait pas originaire d'une "soupe primitive" terrestre, mais elle aurait été expédiée in situ par une civilisation lointaine, dans des temps fort reculés, sous forme de bactéries congelées. Nous serions donc, en fait, les descendants d'extraterrestres, origine qui ne fait pas vraiment peur aux astrophysiciens qui étudient la vie dans le cosmos et à ceux qui adressent des messages à nos "cousins de l'espace", en espérant une réponse prochaine (28).

Crick, en physicien (qu'il est aussi, il ne faut jamais l'oublier) et en biologiste essaie de répondre à l'une des questions philosophiques qui a taraudé tant de bons esprits : " *D'où venons-nous ?* ". Il a repris une vieille idée du physicien italien Enrico Fermi (1901-1954), qui fut, comme Crick, un

scientifique brillant et inventif. Fermi, qui était partisan de la pluralité des mondes habités, s'était persuadé qu'une civilisation avancée, parvenue au terme de la maîtrise de son environnement planétaire, était obligée d'envisager la conquête du monde extérieur, à voyager dans l'espace et, avec le temps nécessaire (des millions d'années, des milliards peut-être), devait avoir essaimé à travers toute la Galaxie. Un examen attentif des planètes disponibles et accueillantes devait obligatoirement, à terme, déboucher sur la reconnaissance de la Terre comme un havre possible, avec ses multiples avantages : abondance de l'eau et de composés organiques, température quasi idéale pour de nombreuses formes de vie entre autres. On connaît la célèbre boutade de Fermi :

" S'il existe quelque part dans la Galaxie des êtres intelligents, pourquoi ne sont-ils donc pas encore ici ? Ils devraient être déjà arrivés. Où sont-ils ? "

Pendant plusieurs années, Crick et Orgel ont travaillé sur les multiples aspects de la panspermie dirigée. Tous les deux pensent que des êtres intelligents (ils existent quasi obligatoirement dans notre propre Galaxie, sans parler des autres), dont l'évolution serait en avance de quelques centaines de millions d'années ou même plus sur la nôtre (c'est là encore une quasi-obligation, ne serait-ce que statistique), auraient ensemencé la Terre en envoyant dans l'espace des fusées ou autres moyens de transport (voiles solaires...) contenant des micro-organismes (spores). Ceux-ci totalement protégés au cours de leur voyage interstellaire auraient pu se développer sur la Terre primitive, malgré l'obstacle important constitué par l'impactisme, qui fut probablement assez redoutable durant les deux ou même trois premiers milliards d'années du Système solaire, pour permettre à la vie de s'installer durablement.

A la question que lui ont posée certains de ses détracteurs concernant la raison qu'auraient eu des créatures intelligentes d'essaimer dans la Galaxie, Crick a répondu avec beaucoup de lucidité qu'une civilisation avancée aurait pu entrevoir la menace de se voir totalement ou partiellement anéantie par un cataclysme naturel (explosion d'une étoile proche par exemple) et de *privilégier la survie, sinon de la civilisation, tout au moins de la vie*. Ne disposant peut-être pas des moyens de s'enfuir eux-mêmes dans l'espace, les membres de la civilisation auraient choisi d'envoyer les fameux micro-organismes dont Crick pense que nous sommes peut-être les (très lointains) descendants.

Science-fiction que tout cela ? Pas forcément. Crick considère son hypothèse comme scientifique, et donc plausible. Dans son livre, il explique en détail toutes sortes de scénarios possibles, souvent très ingénieux, concernant le transfert de bactéries d'une planète à une autre. Il rappelle aussi qu'une seule bactérie extraterrestre peut ensemencer une planète stérile et qu'elle peut voyager plus de 10 000 ans dans l'espace sans dommage particulier. Pour un long voyage, Crick postule pour des bactéries congelées vivantes que l'on pourrait placer par milliards dans un espace extrêmement réduit

(mini-conteneur de quelques centimètres cubes seulement). La plupart de ces bactéries devraient survivre à la décongélation et donc proliférer et se diffuser rapidement, surtout si elles atterrissent dans un océan prébiotique.

Crick et Orgel nous ont montré comment la vie peut être inséminée sur Terre à partir de l'espace. La réciproque est vraie aussi, bien sûr. Il viendra probablement un jour où se sera à l'homme (ou à son successeur) d'envisager sérieusement, *à son tour*, l'ensemencement de planètes voisines ou plus lointaines. La conclusion semble claire : *la vie peut être transférée par une succession de civilisations, d'une étoile à une autre, d'une galaxie à une autre, quasiment partout.*

L'éventualité que nous pourrions être seuls dans l'Univers paraît d'une naïveté assez dérisoire, face à *l'universalité de la vie* mise progressivement en évidence par les exobiologistes (29/30/31). *Le cosmos est vivant !* Nous sommes l'un de ses composants. Modeste certes, et certainement pas le but ultime de la Création ou le Dessein ou le Destin cosmique (32).

Retour sur la panspermie cométaire

L'astrobiologie, qui combine l'astronomie et la biologie, est une spécialité nouvelle qui a le vent en poupe avec la découverte de plusieurs centaines d'exoplanètes (33) dans quasiment toutes les régions de notre Galaxie. Mais cette probable vie que l'on suppose sur ces planètes lointaines ne concerne pas notre petite région locale qu'est le Système solaire.

Théorisée principalement par des chercheurs comme Armand Delsemme et par le tandem Fred Hoyle et Chandra Wickramasinghe, la *panspermie cométaire* reste de loin la solution qui paraît la plus à même d'avoir apporté la vie sur la Terre, qui a pu la garder et la faire fructifier avec le temps, mais aussi sur d'autres planètes et satellites qui, eux, n'ont pas pu la garder et la faire développer pour des raisons diverses.

La panspermie intéresse des jeunes chercheurs. Il n'est pas étonnant que ce soit Janaki Wickramasinghe, la fille de Chandra, qui a pris la relève. Elle forme avec son père un nouveau tandem qui explore tous les aspects du problème. Dans *Comets and the origin of life* (34), cosigné avec son père et William (Bill) Napier, elle explore de nouveaux aspects relevant de domaines divers comme la mécanique céleste, la géologie et la microbiologie. Pour les auteurs de ce livre, les responsables principaux de la panspermie, et donc de la vie importée sur Terre, sont les *comètes sombres* (the dark comets) de grand diamètre qui ont contenu des proportions importantes d'eau liquide. Ils le disent clairement, calculs à l'appui : « *Le changement de phase de la glace en eau liquide pourrait produire de dramatiques conséquences biologiques dans une comète* ». Les micro-organismes existants pourraient (et ont pu dans le passé) se développer rapidement dans un milieu favorable.

Notes

1. Les *quatre* forces fondamentales des physiciens sont la *gravité* (qui sert à expliquer les mouvements des corps célestes), la force *électromagnétique* (qui sert à expliquer l'électricité, les aimants, l'existence des atomes et des molécules), la force *nucléaire* dite *forte* (qui sert à "cimenter" les protons et les neutrons dans le noyau atomique) et la force *nucléaire* dite *faible* qui sert à expliquer la radioactivité bêta qui transforme les neutrons en protons). Ces quatre forces, grâce à leurs actions propres et leurs interactions mutuelles, expliquent la quasi-totalité des phénomènes observés dans l'Univers.
2. H. Reeves, *Poussières d'étoiles* (Seuil, PS 100, 1994). Un livre remarquable de clarté et de précision qui explique fort bien les différentes étapes d'organisation de la matière, de la particule à la vie, via l'étape poussières d'étoiles. Citation p. 21.
3. M.-D. Morch, *Origine et évolution du code génétique*, Revue du Palais de la Découverte, 12, 119, pp. 27-49, 1984.
4. J. Tréfil, *Was the Universe designated for life ?*, pp. 54-57, Astronomy, june 1997.
5. S.J. Dick, *The biological universe* (Cambridge University Press, 1996).
6. E.L. Orgel, *Les origines de la vie. Des fossiles aux extra-terrestres* (Québec-Amérique, 1975). Titre original : *The origins of life* (1973).
7. R. Jastrow, *Des astres, de la vie et des hommes* (Seuil, 1972). Le titre original était différent : *Red giants and white dwarfs* (1971).
8. A. Delsemme, *Les origines cosmiques de la vie* (Flammarion, 1994). Ce livre est sous-titré : *Une histoire de l'Univers du Big Bang jusqu'à l'homme*. Il s'agit d'un livre remarquablement intéressant qui me sert de référence.
9. A. Delsemme, op. cit., p. 314.
10. Y.J. Pendleton and D.P. Cruikshank, *Life from the stars*, Sky and Telescope, pp. 36-42, march 1994.
11. T.R. Geballe and T. Oka, Nature, 28 november 1996.
12. R. Shapiro, *L'origine de la vie* (Flammarion, 1994). Titre original : *Origins, a skeptic's guide to the creation of life on Earth* (1986).
13. E. Boureau, *Au précambrien : naissance du monde vivant*, La Recherche, 68, pp. 541-551, 1976.
14. D. Groves, J. Dunlop et R. Buick, *Les premières traces de vie*, Pour la Science, 50, pp. 22-35, décembre 1981.

15. Cette expérience de Stanley Miller, assistant à l'époque d'Harold Urey, est restée célèbre. Il recréa en laboratoire "*l'atmosphère primordiale*" probable de la Terre il y a quatre milliards d'années. Il introduisit dans son appareillage du méthane, de l'ammoniac, de l'eau et de l'hydrogène au-dessus d'un "océan" d'eau et soumit sa mixture à des décharges électriques tout en chauffant l'eau à plus de 80 °C. Au bout de quelques jours, la composition de son "océan" avait changé et il avait obtenu des *acides aminés* (en particulier, la glycine, l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique). Ce qui montre bien que la Terre peut créer sa propre vie et que l'apport externe (extraterrestre) n'est pas obligatoire.

16. L. Orgel, *Les origines de la vie*, op. cit., p. 118.

17. S.J. Gould, *L'évolution de la vie sur Terre*, Pour la Science, 206, pp. 90-98, décembre 1994.

18. Lucrèce, *De la nature* (Garnier, 1954 ; traduction, introduction et notes de H. Clouard). Titre original : *De natura rerum*. Lucrèce était principalement un poète, mais aussi un philosophe. C'est lui qui fit connaître la doctrine d'Epicure dans le monde romain.

19. C.-H. Martin, *Le cosmos et la vie* (Planète, 1963). Ce livre contient un très intéressant "*Dossier Orgueil*" (pp. 225-239) avec notamment les comptes rendus de l'Académie des sciences et des témoignages de l'époque.

20. G. Claus and B. Nagy, *A microbiological examination of some carbonaceous chondrites*, Nature, 192, pp. 594-596, 1961. C'est l'article moderne qui conclut à une origine extraterrestre pour certains composés organiques trouvés dans la météorite d'Orgueil.

21. F. Hoyle et C. Wickramasinghe, *Le nuage de la vie. Les origines de la vie dans l'univers* (Albin Michel, 1980). Titre original : *Lifecloud. The origin of life in the universe* (1978). Ce livre, controversé à sa sortie et critiqué par de nombreux scientifiques conservateurs, est une contribution essentielle au problème de l'origine extraterrestre de la vie.

22. P.J. Thomas, C.F. Chyba and C.P. McKay (eds), *Comets and the origin and evolution of life* (Springer-Verlag, 1997). Ce livre de référence traite du rôle des comètes dans l'origine et l'évolution de la vie.

23. G. Kurat et M. Maurette, *Matière extraterrestre sur la Terre : de l'origine du système solaire à l'origine de la vie* (Michaël Ittah, 1997).

24. D. Bentaleb, *La vie venue de l'espace*, Science et Vie, 966, pp. 55-65, mars 1998.

25. Texte de Michel Maurette, cité dans l'article précédent, pp. 60-61.

26. A. Brack et F. Raulin, *L'évolution chimique et les origines de la vie* (Masson, 1991).
27. F. Crick, *La vie vient de l'espace* (Hachette, 1982). Titre original : *Life itself* (1981). Autre livre très controversé écrit par l'un des plus grands savants du XX^e siècle.
28. J. Heidmann, *Intelligences extra-terrestres* (Odile Jacob, 1996).
29. F. Raulin-Cerceau et B. Bilodeau, *Les origines de la vie. Histoire des idées*, Ellipses Edition, 2009.
30. A. Meinesz, *Comment la vie a commencé*, Belin – Pour la Science, 2008. Ce livre, sous-titré « *Les trois genèses du vivant* », contient un important système de notes et de références.
31. C. Impey, *The living cosmos*, Cambridge University Press, 2011. Ce livre très intéressant et très bien illustré est sous-titré : « *Our search for life in the universe* ».
32. J.R. Primack et N.E. Abrams, *Destin cosmique*, Robert Laffont, 2008. Sur la quatrième de couverture, on trouve cette phrase : « La vie intelligente n'est ni fortuite ni négligeable : elle occupe dans l'Univers une place particulière insoupçonnée ». Façon bien optimiste de voir les choses !
33. Dossier Pour la Science (collectif), *Exoplanètes, des centaines de nouveaux mondes à explorer*, dossier n° 64, juillet-septembre 2009. Ce dossier étudie tous les aspects du problème, et notamment celui-ci : « Les exoplanètes, terres de vie ? ».
34. J. Wickramasinghe, C. Wickramasinghe and W. Napier, *Comets and the origin of life*, World Scientific Publishing, 2010. Janaki Wickramasinghe, l'auteur principal, a remplacé Fred Hoyle auprès de son père. Son sujet de thèse soutenue en 2008 était : « *The role of comets in panspermia* ». Ce livre est un livre de référence pour tous les chercheurs qui travaillent dans le domaine de la panspermie.

CHAPITRE 15

EXTINCTIONS ET ÉVOLUTION

Un renouvellement permanent des espèces

On estime qu'actuellement cohabitent sur la Terre une quarantaine de millions d'espèces différentes d'animaux et de plantes. La faune et la flore terrestres sont donc extraordinairement prolifiques. Parmi les espèces vivantes du monde animal, on en compte près de 4000 de mammifères réparties en 1000 genres environ (1).

Mais comme le rappelle David Raup dans *De l'extinction des espèces* (2), il est vraisemblable que le nombre des espèces qui ont vécu un moment sur Terre et qui se sont succédé depuis près de quatre milliards d'années se situe entre cinq et cinquante milliards. On table sur 1 espèce sur 1000 qui soit encore vivante, ce qui signifie qu'il y a déjà eu 99,9 % de disparitions. Chiffre qui fait frémir les créationnistes et leur monde de 6000 ans.

C'est donc un extraordinaire *renouvellement* des espèces qui caractérise la vie terrestre, bien que la durée de vie de chacune d'entre elles ait été, et soit encore, très différente selon les cas. C'est clair aujourd'hui pour tous les paléontologues : toute espèce, quelle qu'elle soit, est appelée à disparaître plus ou moins rapidement. Le paléontologue français Jean-Jacques Jaeger l'a expliqué sans détour :

" Tout ce qui vit doit mourir. Il n'y a pas, il n'y a jamais eu d'espèces indestructibles. Estimée à la louche, l'espérance de vie des espèces de grands mammifères ne dépasse pas 8 millions d'années, celle des mollusques 30 millions d'années. " (3)

Dans son livre, David Raup se pose les deux questions fondamentales qui ont tarabusté ses prédécesseurs, à savoir *le pourquoi* : " *Pourquoi autant d'espèces ont-elles péri ?* " et *le comment* : " *Comment se sont-elles éteintes ?* " des extinctions. On connaît sa désormais célèbre alternative : *Bad genes or bad luck ?* (mauvais gènes ou malchance ?). En effet, on se demande pourquoi une espèce, une fois solidement installée, laisserait sa place à d'autres, si aucun phénomène extérieur ne l'obligeait à disparaître.

C'est l'explication de la mort des dinosauriens dans les années 1980 qui a été le déclic dans l'esprit des paléontologues, auparavant bien conservateurs dans leur majorité, même si l'idée d'une mort d'origine cosmique était déjà dans l'air avant la preuve définitive apportée par l'excédent d'iridium dans la couche K/T. On le sait aujourd'hui : *l'extinction est un mécanisme de l'évolution*. Sans un renouvellement épisodique des espèces vivantes, la sélection naturelle, qui a sa place dans l'évolution, mais qui ne peut être

seule en cause, n'aurait pas été en mesure d'engendrer la diversité et la complexité du monde vivant actuel que nous connaissons.

Diversité, complexité sont deux mots clés de l'évolution. On peut aussi parler sans problème de renouvellement permanent. Pour bien comprendre comment on en est arrivé là, il faut adjoindre deux notions fondamentales : extinctions et mutations. Le catastrophisme apparaît maintenant comme très important comme cause de la diversité et de la montée inexorable, obligatoire à long terme, vers la complexité. Et comme je l'ai dit souvent, notre époque n'est qu'une étape, l'homme n'est qu'un jalon.

Une autre question essentielle que l'on est donc obligé de se poser aujourd'hui est celle-ci : " *Quel est l'avenir de la lignée humaine dans ce contexte évolutif irréversible ?* ". On le sait déjà : il est très sombre, n'en déplaise à tous ceux qui croient encore que l'homme est un être exceptionnel, même s'il est vrai qu'il peut influencer sur son environnement.

L'histoire de l'évolution : la nature fait des bonds

J'ai raconté au chapitre 3 comment les savants des XVIII^e et XIX^e siècles s'étaient engagés progressivement sur la voie de l'*uniformitarisme* et du *gradualisme*, principalement du fait du concept nouveau pour l'époque d'une Terre vieille, qui avait avantageusement remplacé la Terre biblique créée il y a 6000 ans seulement. Charles Lyell (1797-1875), le géologue écossais ennemi déclaré du catastrophisme, avait posé en dogme quasi absolu le fait que " *le présent est la clé du passé* " (4).

Cette pseudo-vérité était censée expliquer l'histoire de la Terre, mais aussi celle de la vie, explicitée plus en détail, plus tard, par Charles Darwin (1809-1882), avec sa sélection naturelle (5) qui peut paraître satisfaisante à très court terme. Mais le très court terme, c'est l'espace d'un éclair dans l'histoire de la Terre et de la vie. En science, on le sait bien, tout évolue et les concepts de Lyell et de Darwin, satisfaisants au XIX^e siècle, paraissent aujourd'hui bien parcellaires, extraordinairement vieillissés, tout comme l'est l'astronomie de nos grands-parents qui ne voyaient pas plus loin que leur Galaxie.

Dès le début des années 1970, Niles Eldredge et Stephen Jay Gould (1941-2002) (6) ont montré que *la nature fait des bonds* et que seul le manque de recul à l'échelle géologique fait paraître l'évolution linéaire. Dès que l'on travaille à l'échelle du million d'années, la sélection naturelle ne tient plus et s'avère en tout cas insuffisante pour expliquer l'évolution des espèces.

L'évolution est faite d'avancées, de percées spectaculaires, d'arrêts brusques aussi, de reculs parfois au niveau des genres et des espèces (7). Elle est extraordinairement tributaire de l'environnement cosmique de la Terre, de la présence et des sursauts du Soleil, de l'impact d'astéroïdes et de comètes, et, au niveau particulière, des innombrables radiations cosmiques.

Elle ne se développe pas en vase clos, dans un cocon totalement protégé de l'extérieur. *La vie est un phénomène cosmique parmi d'autres*, tributaire d'un Univers particulièrement violent à l'échelle astronomique. L'évolution ne peut se faire qu'avec un rythme heurté, que par bonds plus ou moins épisodiques. La théorie de Eldredge et Gould des équilibres ponctués (le *ponctualisme*) trouve ici toute sa place.

Fréquence et intensité des extinctions

Les paléontologues recensent cinq extinctions majeures et une vingtaine d'autres secondaires (8). Les Cinq Grandes sont celles de l'Ordovicien, du Dévonien, du Permien, du Trias et du Crétacé. Seules ces cinq grandes peuvent être appelées des *extinctions de masse*, les autres n'ayant entraîné que des extinctions partielles, mais non négligeables pour autant.

Grossièrement, on a calculé qu'une extinction secondaire se produit en moyenne tous les 10 MA et tue 30 % des espèces, alors qu'une extinction majeure se produit en moyenne tous les 100 MA et tue environ 65 % des espèces. Entre-temps, on estime qu'une extinction mineure, entraînant environ la perte de 5 % des espèces, se produit en moyenne tous les 1 MA. C'est le "bruit de fond" des extinctions qui peut être lié surtout aux inversions du champ magnétique terrestre qui débouchent sur une recrudescence des radiations parfois nocives pour des espèces mal protégées et qui entraînent ou leur disparition ou des mutations favorables vers des espèces mieux adaptées, plus sophistiquées et plus complexes. En règle générale, on considère d'ailleurs également le million d'années comme étant aussi une bonne moyenne pour la durée de vie d'une espèce non perturbée par un événement extérieur, avec évidemment des variations individuelles très sensibles en plus ou en moins.

Il y a donc lieu de noter que les trois catégories d'extinctions, les majeures, les secondaires et les mineures sont séparées entre elles par le classique facteur 10 que l'on retrouve souvent en astronomie : respectivement 100 MA, 10 MA et 1 MA.

A la lecture des chiffres ci-dessus, on comprend mieux la complexité du monde vivant actuel. Si chaque million d'années 5 % des espèces disparaissent ou se transforment, si tous les 10 MA 30 % des espèces disparaissent et libèrent des niches écologiques pour des espèces jusque-là confinées à un rôle subalterne (cas des mammifères il y a 65 MA), si tous les 100 MA ce sont les deux tiers du monde vivant qui sont exterminés, on conçoit mieux l'extraordinaire *renouvellement* de la vie terrestre. La montée vers la complexité s'explique moins bien, car souvent il y a recul (tout au moins provisoire) pour certaines espèces, mais globalement elle semble liée indéniablement à une meilleure adaptation à l'environnement, puisque les espèces qui ne peuvent s'adapter sont en fait irrémédiablement condamnées à disparaître à moyen terme. Le recul peut permettre à certaines espèces meurtries, mais non totalement décimées, de rebondir, se fortifier et se diversifier.

Causes possibles des extinctions

Plusieurs milliards d'espèces se sont succédé depuis l'apparition de la vie sur Terre et 99,9 % d'entre elles se sont éteintes d'après les spécialistes. Il est bien évident que les causes de ces extinctions ont été très diverses et que seules une petite partie d'entre elles furent consécutives à des phénomènes d'origine cosmique.

On peut regrouper les causes d'extinction en trois grandes catégories : celles dues à l'espèce elle-même, celles dues à des causes terrestres et celles dues à des causes cosmiques. Je vais en dire quelques mots pour bien situer le problème.

– *Causes dues à l'espèce elle-même.* On regroupe dans cette catégorie les problèmes de compétition avec d'autres espèces concurrentes, de prédation, d'épidémies, de consanguinité, de stérilité, de dégénérescence (disparition des mâles) (9) et surtout de *mutations* permettant l'apparition (on pourrait dire le passage) d'espèces mieux armées pour la survie. La sélection naturelle, chère à Darwin, trouve ici toute sa place. Il paraît évident que la grande majorité des espèces disparaissent (mutent) pour l'une de ces raisons qui ne peuvent concerner que les espèces elles-mêmes et non les extinctions globales ou partielles.

– *Causes terrestres.* On regroupe dans cette catégorie des causes très diverses et d'importance très inégale, comme les changements climatiques dus à la sécheresse ou au refroidissement du climat, la diminution des terres disponibles, la montée ou la diminution du niveau des mers, l'activité volcanique au niveau de la planète, les incendies au niveau d'une région (voir le cataclysme de l'Indonésie en 1997 causé par les hommes eux-mêmes, avec une inconscience coupable et même quasi criminelle, puisque plusieurs centaines d'espèces animales ont été détruites en quelques mois), les changements notables dans la composition chimique de l'atmosphère et l'empoisonnement chimique des eaux océaniques. Là encore, toutes ces causes ont joué au fil des millions d'années, mais sans qu'on puisse en général les considérer comme suffisantes pour engendrer des extinctions de masse, tout au plus ont-elles joué lors d'extinctions secondaires.

– *Causes cosmiques.* On regroupe ici deux sous-catégories très différentes : l'impactisme macroscopique lié aux collisions d'astéroïdes et de comètes de bonne taille (quelques kilomètres de diamètre) et l'impactisme particulière associé aux radiations cosmiques. La première est la cause principale des grandes extinctions de masse, alors que les radiations sont plutôt responsables du "bruit de fond" des extinctions et dont l'échelle est de l'ordre du million d'années, échelle comparable, je l'ai dit, à celle de l'espérance de vie moyenne d'une espèce.

Les causes terrestres et cosmiques de grande envergure peuvent à coup sûr générer le fameux "hiver nucléaire" (en fait "volcanique" ou "cosmique" selon le cas) dont les simulations modernes par ordinateur montrent qu'il peut

être très dangereux pour certaines espèces concentrées sur des territoires peu étendus. Plus une espèce est répandue numériquement et surtout répartie sur l'ensemble de la planète, plus elle a de chances de survivre partiellement à un cataclysme quasi global au niveau de la Terre. Les rescapés sont aptes à avoir une descendance viable, mais dans certains cas l'espèce peut être déstabilisée, affaiblie et condamnée à moyen terme.

Les cinq grandes extinctions de masse

Je vais en dire quelques mots, par ordre chronologique. Les années sont les données 2009 retenues par la *Geological Society of America*.

— *La fin de l'Ordovicien* (444 MA). Il s'agit de la première grande extinction du registre fossile (car bien sûr il y a eu d'autres plus anciennes). Elle élimina plus de la moitié des espèces marines (planctons, algues, coraux, trilobites, poissons). A cette époque, la vie n'avait pas encore investi la terre ferme. Une anomalie en iridium décelée dans certaines couches géologiques, en Chine, au Canada et en Ecosse, laisse à penser que l'origine de cette extinction est d'origine cosmique.

– *La fin du Dévonien* (359 MA). Cette importante extinction extermina elle aussi de nombreuses espèces marines (planctons, coraux, éponges, trilobites, poissons). Sur la terre ferme, que la vie avait commencé à envahir, plusieurs espèces d'amphibiens firent décimées. Là encore, plusieurs pics d'iridium furent découverts, notamment en Chine et en Australie. Des microtectites (preuve d'un impact incontestable) ont été identifiées en Chine et même en Belgique.

– *La fin du Permien* (251 MA). C'est la plus spectaculaire des grandes extinctions, puisque l'on estime que près de 90 % des espèces vivantes disparurent, aussi bien sur la terre ferme que dans les océans. On table sur environ 20 millions d'espèces existantes avant le cataclysme destructeur, seulement 2 millions auraient survécu. Cela veut dire que 18 millions d'espèces différentes auraient été anéanties dans cette seule catastrophe, jamais renouvelée depuis par son ampleur. On appelle d'ailleurs la fin du Permien "la grande mort". Des pics d'iridium anormaux sont associés à cette période, découverts notamment en Inde et en Chine. La fin du Permien correspond, on le sait, à la fin de l'ère Primaire, ce qui dénote bien l'importance exceptionnelle de cet événement, lié peut-être à un impact multiple sur la Terre dans ce qui est l'Amérique du Sud actuelle.

– *La fin du Trias* (201 MA). Cette quatrième extinction de masse est caractérisée par la disparition de nombreux vertébrés marins, notamment les placodontes qui furent définitivement anéantis. Sur la terre ferme, on note surtout de nombreuses extinctions en Amérique du Nord, lieu probable de l'impact cosmique. Par contre, les premières espèces de dinosaures, déjà présentes sur Terre, arrivèrent à survivre partiellement, ce qui prouve que la vie resta possible dans certains endroits. A noter aussi une extinction

végétale massive. Là encore, on a noté des pics d'iridium et aussi des traces de quartz choqués en Italie, ce qui semblerait indiquer un impact multiple.

– *La fin du Crétacé* (65 MA). Elle est liée au fameux impact cosmique dont j'ai parlé au chapitre 12, avec surtout la mort des dinosauriens, mais l'impact fut aussi la cause de la disparition des deux tiers des espèces terrestres. Il est associé à la fin de l'ère Secondaire, ce qui indique bien l'importance exceptionnelle de cet événement sur le plan biologique.

Extinction = régénération = moteur de l'évolution

Globalement, on peut dire que, suite à chacune de ces grandes extinctions de masse, l'évolution fut évidemment relancée à partir des formes *survivantes* , soit environ un tiers en moyenne d'après les statistiques. Ces survivants étaient presque toujours de petite taille, puisque les gros animaux, plus vulnérables et plus tributaires de l'environnement, obligatoirement très défavorable durant la période post-catastrophe, furent les principales victimes de ces cataclysmes gigantesques.

A la lumière des simulations actuelles, on suppose qu'après une assez courte période (à l'échelle géologique), les conditions climatiques retrouvent leurs caractéristiques normales. La vie, en toute logique, reprend progressivement son cours après ce qui est en fait un simple accident de parcours dans la très longue histoire de la Terre. L'évolution redémarre d'abord lentement, puis souvent ensuite d'une manière explosive, et assez rapidement on se trouve en présence d'une biodiversité accrue et *complexifiée*.

Ces simulations, basées sur de nombreux paramètres, ont clairement montré que la régénération des espèces apparaît extraordinaire quand on compare deux arbres évolutifs, l'un avec extinctions fréquentes telles qu'on les observe, l'autre sans extinction. Dans le premier, de nombreuses espèces sont apparues, ont évolué, puis la plupart ont disparu à la suite d'extinctions majeures (65 % tous les 100 MA) ou secondaires (30 % tous les 10 MA). Les espèces ayant survécu jusqu'à nos jours sont rares. Dans le second arbre sans extinction, les espèces ne s'éteignent pas, elles évoluent : la biodiversité est sept fois supérieure et tend même vers la saturation. Par contre, la complexification serait moindre, la sélection naturelle jouant son rôle à fond, sans remise en cause épisodique comme c'est le cas avec les extinctions de masse ponctuelles. Si cette évolution non catastrophiste était la règle sur le long terme, ce qui n'a jamais été le cas, on se rend compte qu'il se poserait alors rapidement un incontestable problème de cohabitation et d'espace vital raréfié. L'extinction serait alors d'une tout autre nature, liée principalement au "trop-plein" de créatures vivantes existantes, qui se concurrenceraient et s'élimineraient elles-mêmes, comme on l'observe parfois quand plusieurs espèces rivales cohabitent sur un territoire trop exigu.

Il est clair, comme l'a montré S.J. Gould, que sans extinctions massives dès le début de l'évolution sur la Terre, la vie actuelle serait très différente de celle que nous connaissons. Certains genres qui avaient réussi à émerger d'une façon significative avant d'être détruits à la fin du Permien auraient réussi à se maintenir. L'étude des archives fossiles, notamment les célèbres faunes d'*Ediacara* et de *Burgess* (10), montre que d'autres formes de vie parfaitement adaptées à l'époque à laquelle elles sont apparues proliféraient, mais qu'elles ont eu *la malchance* d'être confrontées à un cataclysme destructeur et d'être décimées, et même de disparaître totalement.

Pour revenir à l'extinction de la fin du Secondaire, il est bien clair que c'est l'homme qui, à long terme, en a été le principal bénéficiaire. Le paléobiologiste canadien Dale Russell, qui a organisé un symposium sur l'extinction dès 1976, bien avant qu'il soit question d'iridium excédentaire, et un second en 1981, alors qu'au contraire l'hypothèse des Alvarez s'imposait déjà irrésistiblement dans les milieux scientifiques, et qui a étudié tout particulièrement les dinosaures, a résumé d'une façon lumineuse la chance des petits mammifères rescapés du cataclysme :

" L'espèce humaine a peut-être été le bénéficiaire, à long terme, de cette catastrophe. En effet, alors que le Mésozoïque touchait à sa fin, certains petits dinosaures carnivores avaient atteint le stade d'évolution où le rapport du poids du cerveau à celui du corps était égal à celui des premiers mammifères. Si ces animaux, probablement plus intelligents que les autres reptiles, avaient survécu, leurs descendants auraient sans doute pu s'opposer à la montée des mammifères, occupant ainsi notre position actuelle d'animaux les plus intelligents de la planète. " (11)

Dale Russell ajoutait dans un autre article :

" L'évolution des dinosaures carnivores s'acheminait vers une créature bipède, agile, dotée de membres antérieurs préhensibles, d'une vision stéréoscopique et d'une intelligence s'apparentant à celle des mammifères modernes. S'ils avaient vécu plus longtemps, peut-être se seraient-ils acclimatés comme les oiseaux ? Où cette évolution les aurait-elle menés ? Le champ est ouvert à la spéculation... mais ne pourrait-on pas imaginer un saurien ayant à peu près les caractéristiques suivantes : taille : 2 mètres ; poids : 75 kg ; signes particuliers : se tient debout et est doté d'un cerveau et d'une capacité de préhension qui lui permettent de modifier son environnement selon ses besoins. " (12)

Le cataclysme est bien l'un des moteurs essentiels de l'évolution, et cela depuis l'apparition de la vie sur Terre. Un cataclysme unique, probablement d'origine cosmique, a détruit toute une branche de l'évolution avec la faune d'Ediacara qui occupa de nombreuses régions il y a 600 MA, avant la fin du

Précambrien. C'est ce que certains paléontologues ont appelé le "faux départ de la vie". On a peut-être identifié le coupable de cette extinction : l'astéroïde qui a creusé l'astroblème d'Acraman, en Australie, qui a été repéré de l'espace (il est indiscernable du sol) et daté d'environ 580 MA.

Corrélations extinctions - astroblèmes

Un problème essentiel pour la crédibilité de la théorie paléontologique des impacts cosmiques est la *corrélation extinctions - astroblèmes*. On sait qu'il a fallu la découverte tardive du cratère mexicain de *Chicxulub* pour prouver définitivement la corrélation entre l'extermination des dinosaures et l'impact d'un astéroïde ou d'une comète il y a 65 MA.

Depuis longtemps, certains scientifiques, astronomes et géologues, essaient de faire coïncider la fin des périodes géologiques avec des astroblèmes. Ils croient que cette voie moderne est la bonne, même si l'on en est encore au stade des préliminaires et que l'âge de nombreux astroblèmes reste assez approximatif (à quelques millions d'années près). Sur les 15 périodes géologiques retenues, 10 sont associées à des astroblèmes possibles, c'est-à-dire les deux tiers. C'est déjà un beau succès, et ce n'est qu'un début.

A noter la relation possible entre la fin du *Précambrien* et l'astroblème australien d'Acraman qui a survécu sous la forme d'un grand lac de 160 km, visible de l'espace. On est obligé de penser à lui quand on étudie attentivement le cataclysme du Précambrien, période bénie de l'évolution avec la première vraie *explosion* de la vie. Explosion réduite quasiment à néant à la suite d'un impact destructeur. L'astéroïde responsable devait avoir 8 km de diamètre, et l'énergie dégagée a pu être de 8×10^{22} joules, largement suffisante pour engendrer un hiver d'impact, particulièrement difficile à supporter pour une vie encore primitive.

La fin de l'*Ordovicien*, première extinction de masse, date de 444 MA et n'est actuellement associée à aucun astroblème, ce qui n'a rien de surprenant, d'autant plus, il faut le rappeler, que toutes les extinctions, qu'elles soient de masse ou secondaires, ne sont pas forcément dues à des événements d'origine cosmique. D'autre part, l'impact destructeur, s'il a existé, a pu être maritime et donc ne pas laisser de trace apparente.

La deuxième extinction de masse, celle de la fin du *Dévonien* est datée de 360 MA. On la croit associée à deux grands astroblèmes, ceux de Siljan, en Suède, de 52 km de diamètre, et de Charlevoix, au Canada, qui a 46 km. L'impact cosmique ne fait pas de doute à cette époque puisque des microtectites, découvertes en Chine et en Belgique, sont associées également à ce cataclysme. La répartition bizarre des zones de microtectites et des deux astroblèmes possibles postule pour un impact double ou multiple.

La fin du *Carbonifère*, datée de 299 MA, est considérée comme une extinction secondaire, du fait du pourcentage, seulement moyen, d'espèces

anéanties. On la relie aux fameux astroblèmes jumeaux canadiens, les Clearwater Lakes, formations de 32 et 22 km de diamètre, d'âge équivalent.

La troisième extinction de masse est celle de la fin du *Permien* et datée de 251 MA. 90 % des espèces vivantes ont été anéanties à cette époque. Elle pourrait être associée à deux grands cratères repérés sur le plateau continental des Malouines, d'un diamètre de 300 km chacun, à l'astroblème océanique de Bedout dans l'océan Indien qui a 200 km de diamètre et à l'astroblème brésilien d'Araguinha qui a 40 km. Il pourrait y avoir eu un impact de très grande envergure, dû à un astéroïde de 20 km de diamètre qui se serait fragmenté en quatre fragments majeurs.

La quatrième extinction de masse est celle de la fin du *Trias*, datée de 201 MA et associée au fameux cratère canadien de Manicouagan qui a 100 km de diamètre. Selon les critères habituels l'astéroïde tueur devait avoir environ 5 km, ce qui n'est pas extraordinaire, mais les dégâts furent terribles puisqu'ils engendrèrent une extinction de masse.

Pour la fin du *Jurassique*, extinction secondaire datée de 145 MA, on a comme coupable possible l'astroblème maritime de Mjolnir dans la mer de Barentz d'un diamètre de 40 km. Mais il n'est pas exclu que d'autres formations du même âge viennent se substituer ou compléter celle-là.

La fin du *Crétacé* est datée de 65 MA. C'est la fameuse extinction des dinosaures dont il a été question au chapitre 12, associée d'une façon certaine à l'astroblème mexicain de Chicxulub de 180 km de diamètre. L'impacteur principal avait donc un diamètre de l'ordre de 9 km, ce qui en fait un très gros EGA, d'autres fragments plus petits ayant peut-être complété une œuvre de mort, dont l'homme a été le principal *bénéficiaire*, comme nous le savons maintenant. La libération de niches écologiques par des concurrents, peu disposés à partager la place disponible avec les espèces montantes, a été un événement totalement fortuit et décisif.

Pour la fin du *Paléocène*, datée de 56 MA, les géologues proposent les cratères jumeaux de Kara en Russie qui ont 65 et 25 km. Il ne s'agit que d'une extinction secondaire, facilement assimilée par une vie régénérée par le cataclysme précédent plus ancien de 7 MA.

La fin de l'*Éocène* est datée de 34 MA. C'est un tournant pour la vie que les paléontologues ont appelé "la grande coupure" (13), même si elle n'a engendré qu'une extinction dite secondaire. Comme nous l'avons vu au chapitre 11, pas moins de quatre astroblèmes sont voisins de cette date charnière : Chesapeake Bay et Tom's Canyon qui sont probables, le golfe du Saint-Laurent qui est possible, et même Popigai, en Russie, qui est certain, mais dont l'âge n'est peut-être pas en phase avec cette extinction.

Pour la fin de l'*Oligocène*, il y a 23 MA, longtemps non associée avec des astroblèmes, on est aujourd'hui en présence de deux possibles : Haughton Dome, au Canada, de 24 km, et surtout Kara-Kul, au Tadjikistan, repéré

depuis peu, et dont le diamètre est de 52 km. A noter que Haughton Dome est le plus septentrional des grands astroblèmes connus, et donc que l'impact aurait pu avoir lieu dans une région glaciaire avec des conséquences peut-être un peu différentes, notamment une déglaciation partielle mais sévère compte tenu de la chaleur dégagée en quelques secondes.

Pour les autres cratères ultérieurs, on ne peut pas vraiment les associer à des extinctions de masse ou même secondaires, mais l'association avec la montée des Simiens vers le statut *d'Homo sapiens* semble évidente, comme nous allons le voir dans la section suivante.

Enfin, je rappelle ce que j'ai dit dans le chapitre consacré aux astroblèmes. On connaît de nombreuses formations anciennes de grande taille qui ont de fortes chances d'être d'origine cosmique. Le XXI^e siècle permettra sans doute d'en identifier certaines, qui pourront alors compléter la liste des objets recensés ou se substituer à certains astroblèmes supposés (supposés, car il sera très difficile d'obtenir les preuves d'une liaison réelle avec la fin des périodes géologiques incriminées, plusieurs dizaines ou même centaines de millions d'années après les cataclysmes responsables).

La paléanthropologie face à la théorie de l'impactisme terrestre

La paléanthropologie est la science des hommes fossiles dont elle s'applique à retracer l'évolution. Cette science a fait des progrès extraordinaires depuis le début des années 1960, et elle opère sa révolution en permanence depuis que les spécialistes ont découvert des filons d'un intérêt exceptionnel en Afrique (notamment en Tanzanie, au Kenya et en Ethiopie) (14). Ces régions privilégiées ont livré quelques fossiles qui ont remis en question toutes les théories anciennes et les anciennes datations. Aujourd'hui, même si tout est loin d'être dit, on connaît quand même assez bien l'évolution des espèces depuis le début de l'ère tertiaire, en particulier celle des Primates.

Purgatorius, survivant de l'extinction de -65 MA

Le premier Primate connu date de 70 MA, ce qui veut dire qu'il a connu les cinq derniers millions d'années de l'ère secondaire. Il s'agit du *Purgatorius*, animal ressemblant à une musaraigne et descendant des Protoinsectivores, ancêtres directs des Insectivores et des Primates. Notre lointain ancêtre doit son nom à la Colline du Purgatoire, dans le Montana, où il a été retrouvé. Il est important de signaler que *Purgatorius* est un miraculé puisque l'élimination des grands reptiles lui a pratiquement laissé le champ libre, et il a pu se développer, très progressivement, en compagnie d'autres Primates primitifs que l'on regroupe sous le nom de Prosimiens.

Tous les Primates ont en grande partie les mêmes constituants chromosomiques, reconnaissables par une série de bandes coloriables permanentes d'une espèce à l'autre. Les biologistes et les généticiens (15) de

notre époque savent expliquer parfaitement le "comment" des grands remaniements chromosomiques qui ont conduit, au fil des millénaires, à l'importante diversité des espèces de Primates, à défaut de savoir expliquer le "pourquoi". Les mutations chromosomiques consistent en des cassures et des recollages de morceaux de chromosomes les uns sur les autres et sont probablement provoquées par des radiations. Chaque mutation chromosomique constitue une barrière génétique irréversible et engendre donc une espèce différente.

On comprend mieux ainsi à la fois l'importance capitale des radiations (obligatoirement d'origine cosmique avant l'ère industrielle) dans la théorie de l'évolution en général, et aussi le nombre incroyablement élevé d'espèces différentes dans le milieu animal et même dans celui plus restreint des Primates. Car n'oublions pas que ceux-ci ne sont qu'un *ordre*, dépendant de la *classe* des Mammifères appartenant au *règne* animal. Tout ce que je dis pour les Primates reste valable pour toutes les autres créatures du monde vivant, qu'il soit animal ou végétal.

Des Prosimiens aux Simiens

Après ce court et indispensable intermède génétique, je reviens à nos Prosimiens qui vont dominer le monde entre -65 MA et -34 MA, en se diversifiant en de multiples espèces différentes. On regroupe celles-ci en quatre grands groupes (infra-ordres) : les *Plésiadapiformes* (dont fait partie *Purgatorius*), les *Lémuriformes*, les *Lorisiformes* et les *Tarsiiformes*. Certains de ces Prosimiens existent encore de nos jours, mais sous des formes plus modernes évidemment. L'une des caractéristiques communes à tous ces Prosimiens (fossiles et actuels) est la mâchoire à trente-six dents.

C'est vers -34 MA que se produit un événement cataclysmique très important dont j'ai déjà parlé : l'impact d'un astéroïde de plusieurs km sur la Terre, qui creusa l'astroblème de Chesapeake Bay aux Etats-Unis, d'un diamètre de 90 km, et peut-être aussi celui, soupçonné, du golfe du Saint-Laurent au Canada. Il est certain que cette catastrophe a eu une responsabilité dans les mutations qui ont affecté le monde vivant à cette époque. L'association d'un hiver nucléaire qui annihile en quelques semaines une grande partie de la vie macroscopique, suivi d'une inversion du champ géomagnétique, a des effets désastreux sur le monde vivant. Une averse ininterrompue de rayons cosmiques durant quelques centaines ou milliers d'années, accompagnée d'une augmentation sensible de la radioactivité, débouche obligatoirement sur des mutations.

C'est à cette même époque de -34 MA qu'apparaît l'*Oligopithèque*. Certains Prosimiens se transforment à la suite de mutations génétiques favorables et deviennent des *Simiens*. Avec ceux-ci apparaît pour la première fois la mâchoire à trente-deux dents qui est encore la nôtre, et qui est considérée par tous les paléontologues comme une étape importante dans l'histoire de l'évolution. La taille aussi évolue, puisque l'*Oligopithèque* est un animal quadrupède de 30 cm de hauteur.

Dans *La Terre bombardée*, en 1982, j'écrivais ceci (16) :

" La coïncidence fortuite entre l'impact d'un EGA et l'évolution des espèces peut être difficilement retenue, puisque le même phénomène va se reproduire cinq millions d'années plus tard, vers -30 MA, et plusieurs fois par la suite.

Vers -30 MA, le très important impact d'un EGA de 5 km de diamètre créa l'astroblème de Popigai en Sibérie orientale et déclencha un nouvel hiver d'impact et une nouvelle inversion du champ magnétique. Le résultat sur le plan paléontologique fut la différenciation des Simiens en quatre groupes distincts qui sont les souches des grands groupes actuels : l'*Aeolopithèque* qui semble être l'ancêtre des Gibbons et des Siamangs, l'*Aegyptopithèque* qui semble être l'ancêtre des Chimpanzés et des Gorilles, le *Propriopithèque* qui pourrait être l'ancêtre de l'homme se diversifient à partir de l'*Oligopithèque* qui, lui, continue son évolution séparément et qui semble être l'ancêtre des petits singes (les Cercopithèques). "

Aujourd'hui, la datation retenue pour Popigai est -35 ± 5 MA, et de nombreux géologues ont tenté de la préciser davantage. Force est donc de constater que la corrélation que je donnais comme probable reste à démontrer, sans être pour autant totalement exclue. Mais la différenciation des Simiens en quatre grands groupes pourrait fort bien avoir eu une cause autre qu'astronomique.

Abandonnons les trois autres groupes et occupons-nous uniquement du *Propriopithèque*, l'ancêtre des *Hominidés*. Entre -30 MA et -15 MA, il va se redresser et abandonner la forêt, où il vivait depuis toujours, pour la savane. Pour cette période, rien ne nous autorise à associer une quelconque évolution à un événement d'origine cosmique, encore qu'on ne puisse exclure des impacts océaniques (qui existent dans une proportion de 7 sur 10).

Le Nördlinger Ries et le tournant de l'histoire préhumaine

Vers -15 MA, on sait qu'il y eut un important impact d'EGA, celui qui créa le fameux triplet de cratères allemands : Nördlinger Ries, Steinheim et Stopfenheim Kuppel, liés eux aussi à une inversion géomagnétique. Le résultat de l'averse de rayons cosmiques pourrait être le *Kenyapithèque* que l'on a daté de 14 MA et que l'on associe au *Ramapithèque*. C'est à ce petit Primate que le paléontologue britannique Louis Leakey (1903-1972) " a mis le premier caillou dans la main ", et qui est donc considéré comme le premier utilisateur de l'outil. C'est donc peut-être l'EGA de Nördlinger Ries qui est (indirectement) à la base de la mutation favorable qui a poussé notre petit ancêtre à se servir de son cerveau pour améliorer ses conditions de vie et de nourriture.

Vers -10 MA, apparaît un Primate très curieux : le *Gigantopithèque*. Comme son nom l'indique, il est de très grande taille et dénote nettement avec les Primates étudiés précédemment, qui étaient tous des créatures "miniatures" par rapport à l'homme actuel. Il est peut-être exagéré de l'associer à l'astroblème de Karla en Russie, qui fut créé il y a 10 MA par un EGA d'environ 1 km, mais comme les dates coïncident on ne peut s'empêcher de faire le rapprochement. Le phénomène de gigantesque pourrait être dû (et s'expliquerait mieux aussi avec ce mécanisme exceptionnel) à des radiations exceptionnellement énergétiques, peut-être en provenance de *l'explosion d'une supernova* dans une région relativement voisine de la Galaxie. Il semble que le Gigantopithèque se soit éteint vers -2 MA, après avoir été contemporain des premiers hommes véritables.

Vers -7 MA, apparaît en Afrique australe un nouveau venu fort intéressant : l'*Australopithèque*, descendant du Ramapithèque et ancêtre direct de l'homme, qui va s'éteindre vers -1 MA. On ne peut lui associer aucune collision cosmique et cela n'a rien de surprenant. La Terre est capable d'inverser toute seule (grâce à son noyau) son champ magnétique et elle n'a pas toujours besoin du "coup de pouce du cosmos" pour être victime, et *bénéficiaire* aussi, d'une averse de rayons cosmiques, responsable de mutations génétiques. La montée de l'homme vers sa forme actuelle et *provisoire* est due à la fois à des phénomènes purement terrestres ou d'origine cosmique. L'Australopithèque est un bipède permanent, haut de 1 mètre à 1,50 mètre et pesant de 20 à 50 kg. Sa capacité endocrânienne est de 400 à 600 cm³, ce qui est assez important compte tenu du poids du corps restreint. Bien entendu, l'Australopithèque se sert de l'outil et il est même capable d'en tailler lui-même.

Elgygytgyn, l'astroblème qui annonce Homo

Vers -4 MA, apparaît notre premier ancêtre à qui les paléontologues octroient l'appellation d'Homo : c'est *Homo habilis*. Un impact d'EGA de bonne taille est recensé pour la même époque, celui qui a créé le cratère sibérien de Elgygytgyn, d'un diamètre de 23 km et bien reconnaissable sur les photos prises de l'espace. L'astéroïde responsable était donc capable d'inverser le champ magnétique terrestre, et d'engendrer lui aussi "son" averse de rayons cosmiques et "ses" mutations. Les deux événements sont-ils vraiment liés ? Il n'est pas exclu que l'avenir le dise d'une façon précise, car on arrive vers la fin de l'ère tertiaire et les témoignages des couches géologiques deviennent plus clairs et plus "lisibles". Peut-être associera-t-on dans quelques siècles l'impact de Elgygytgyn à l'hominisation définitive, mais il est encore beaucoup trop tôt pour le faire.

Je rappelle que pour -2,15 MA, on a repéré le premier impact océanique récent, celui appelé *Eltanin*, du nom du navire de recherche américain qui a fait les carottages décisifs (voir le chapitre 13). L'astéroïde avait entre 1 et 4 km de diamètre et a causé un hiver d'impact dont ont été témoins (et acteurs malheureux) nos ancêtres *Homo habilis*, sans pour autant les détruire totalement. Bien que vulnérables, ils ont survécu à leur premier

cataclysme cosmique d'envergure, ce qui est une bonne nouvelle et un espoir pour l'humanité actuelle.

Mais il faut savoir que très peu de temps après l'impact, *Homo erectus* fait son apparition parmi les créatures "haut de gamme" de l'évolution. Y a-t-il eu corrélation entre l'impact destructeur et cette modernisation de certains *Homo habilis*, peut-être plus irradiés (positivement) que leurs congénères restés à l'espèce précédente plus primitive ? En tout cas, les deux espèces vont cohabiter durant près d'un million d'années, la barrière chromosomique n'étant peut-être pas toujours infranchissable. On peut, en fait, envisager deux sous-espèces interfécondes, capables de se métisser pour le plus grand bien du genre *Homo*.

C'est cet *Homo erectus* primitif qui se lance à la conquête du monde, car il ne faut jamais oublier que jusqu'alors *Homo habilis* restait confiné en Afrique. C'est également lui qui subira deux petits impacts d'EGA de 500 mètres, vers -1,1 MA et vers -1,0 MA. Ce dernier est associé à la fois au lac-cratère ghanéen de Bosumtwi et à l'événement géomagnétique de Jaramillo.

A *Homo habilis*, plus primitif et donc moins évolutif, qui s'est éteint de sa belle mort vers -1 MA, succède donc seul *Homo erectus* dont on connaît plusieurs sous-espèces.

Le dernier grand drame : Wilkes Land

Et de catastrophes en mutations, nous arrivons à l'événement majeur de l'ère quaternaire (continuation naturelle de l'ère tertiaire et qui n'est que l'ère de l'homme), c'est-à-dire l'impact de Wilkes Land, dont j'ai déjà eu l'occasion de parler à maintes reprises. Je rappelle ce cataclysme : un EGA de 12 km heurte la Terre, libérant une énergie de $9,0 \times 10^{23}$ joules, soit l'équivalent de près de 5000 ans d'énergie sismique terrestre. Les conséquences, outre le cratère-fantôme de Wilkes Land, ont été la formation des australasites, la dernière inversion du champ géomagnétique, l'altération de l'atmosphère terrestre, un bombardement de rayons cosmiques, une augmentation sensible de la radioactivité et un hiver d'impact comme il ne s'en est pas reproduit depuis. Cela fait beaucoup pour nos pauvres ancêtres.

Cette date de -700 000 ans est un tournant important, décisif même, dans l'évolution des espèces. Avant l'événement, on trouvait sur la Terre une espèce primitive d'*Homo erectus*. Après l'inversion géomagnétique, vers -700 000 à -400 000, on retrouve plusieurs espèces modernes d'*Homo erectus*, notamment le *Sinanthrope*, le *Pithécanthrope* et l'*Atlanthrope*. Mais apparaissent également dès cette époque les Présapiens, ancêtres directs de l'homme actuel (*Homo sapiens*), qui ne diffèrent de celui-ci que par des traits ne dépassant pas le niveau de la sous-espèce. Il paraît évident que les radiations cosmiques ayant eu lieu vers -700 000 ont entraîné des mutations génétiques favorables qui ont bénéficié à l'*Homo erectus* primitif. Quelle révélation si cela est confirmé un jour.

Les Présapiens, qui se "modernisent" très progressivement, et *Homo erectus* se maintiennent d'une façon parallèle jusqu'en -100 000 (il n'était pas question alors de surpopulation et il y avait sur Terre place pour tout le monde). A cette époque, *Homo erectus* disparaît totalement, ayant fort bien fait son travail de transition, et victime de l'usure du temps comme toutes les autres espèces primitives. "Tué par le progrès", pourrait-on dire dans un raccourci un peu facile. Mais c'est toujours le plus moderne qui survit en l'absence d'une extinction de masse ou secondaire qui met tout le monde d'accord en faisant un ménage complet.

***Homo sapiens* reste seul en lice**

Seul *Homo sapiens* reste en lice, sous deux sous-espèces différentes, les Néanderthaliens (*Homo sapiens neanderthalensis*) qui s'éteindront sans laisser de descendance (probablement par métissage) vers -40 000 et *Homo sapiens sapiens*, qui à partir de cette même date, se diversifie pour former les différents types humains que l'on connaît aujourd'hui.

Cette époque de -40 000 (à 2000 ou 3000 près) est une étape notable dans l'histoire récente de la nature, car on sait aussi qu'un nombre important de grands animaux (notamment des mammouths) ont subitement été anéantis, probablement à la suite d'un cataclysme non identifié, mais qui pourrait fort bien avoir été d'origine cosmique. Un impact océanique ou une explosion dans l'atmosphère, qui sont fréquents et ne laissent pratiquement pas de traces, peuvent là encore être envisagés, peut-être même avec la capture et la première fragmentation de Hephæstos. Une multitude de résidus de taille kilométrique et hectométrique étaient alors lancés sur des orbites proches de la Terre, et l'un ou même plusieurs de ces fragments ont très bien pu perturber à la fois la biosphère et la cryosphère. Cependant, il faut convenir que pour le moment les preuves sont beaucoup trop minces pour que l'on puisse associer sérieusement un tel événement avec la disparition de l'homme de Néanderthal, plutôt victime, comme ses prédécesseurs *Homo habilis* et *Homo erectus*, de l'usure du temps.

Le catastrophisme : un enchaînement d'événements

Il faut maintenant conclure sur ces "coïncidences" à répétition entre l'impactisme terrestre et l'évolution des espèces. On a vu que depuis la disparitions des Dinosauriens, vers -65 MA, de nombreuses associations étaient possibles entre impacts et mutations génétiques. On peut certes parler d'approximations au sujet des datations concernant les uns et les autres, il n'empêche que le fond des choses est assez clair.

A chaque fois, on note un enchaînement d'événements, pratiquement toujours les mêmes. En remontant la filière, on peut dire qu'il y a changement et évolution dans les différentes espèces animales et végétales parce qu'il y a *mutation génétique*. Il peut y avoir aussi régression et

extinction de certaines espèces, en cas de mutations défavorables. Il y a mutation parce qu'il y a *irradiation*, c'est-à-dire exposition nocive à des radiations cosmiques contre lesquelles l'organisme des êtres vivants n'est pas immunisé. Il y a radiations parce qu'il y a *averse de rayons cosmiques*, celle-ci étant due à une annulation du champ magnétique terrestre. Cette dernière peut être propre à la Terre ou due à des collisions importantes avec des objets cosmiques (EGA et comètes). On voit que tout est lié, que tout s'enchaîne selon un ordre immuable. Chaque inversion géomagnétique engendre des mutations. C'est le " bruit de fond " des extinctions, quasi permanent à l'échelle géologique, et tout à fait normal en quelque sorte.

On a beau se boucher les yeux et ne pas vouloir y croire, il y a bel et bien corrélation entre les impacts d'EGA et les conséquences de l'impactisme particulière sur l'évolution des formes vivantes terrestres. Comme je l'ai dit dès l'introduction de ce livre : la vie terrestre, sous sa forme actuelle, n'est qu'un *sous-produit* de l'impactisme terrestre. *Le catastrophisme, même s'il n'est pas seul en cause, est l'un des moteurs de l'évolution.*

Et il ne faut pas s'y tromper : *l'évolution est continue, irréversible, imprévisible et explosive, puisqu'elle se diversifie dans toutes les directions. Cela implique que l'homme actuel n'est qu'un maillon de cette chaîne sans fin, qu'il est simplement le "Primate à la mode" et pas le "bijou de la Création",* comme le croient encore les créationnistes fondamentalistes. Nous avons vu au chapitre 2 que leurs confrères plus modernes, qui acceptent le concept de "*science de la Création*", sont d'accord avec cette vision des choses et plaident, d'une manière plus pragmatique, pour un "*être humain évolutif*" à une cadence et selon un schéma préétablis par le Créateur !

L'avenir de l'homme est sombre sur le plan génétique. Dans trente millions d'années, peu de chose en fait à l'échelle géologique, puisqu'une telle période représente nettement moins de un pour cent de l'âge du Système solaire, il sera aussi *démodé* que l'est pour nous l'*Oligopithèque*, notre premier ancêtre qui a eu trente-deux dents comme nous. L'homme actuel, il faut le répéter, est un *accident de l'évolution*. *Il est le fruit du cataclysme. Un fruit évidemment périssable.* Dure leçon ! Difficile à accepter pour beaucoup.

L'importance de la contingence

La *contingence* est la possibilité, l'éventualité qu'une chose ou un événement arrive ou non, et on l'oppose souvent à la *nécessité*. Pour les paléontologues, la contingence a un sens plus profond. Ainsi Stephen Jay Gould, qui a toujours insisté sur son importance, a écrit ceci :

" Les extinctions de masse préservent ou éliminent les espèces au hasard, et le résultat est contingent, en ce sens qu'il est dépendant de tout ce qui s'est passé auparavant...

L'ordre actuel n'a pas été imposé par des lois fondamentales (sélection naturelle, supériorité mécanique dans l'organisation anatomique), ni même par des principes généraux de niveau moins élevé, touchant à l'écologie ou à la théorie de l'évolution. L'ordre est largement le produit de la contingence. " (17)

On le sait depuis longtemps, toutes les espèces sont mortelles, *y compris la nôtre*, ce qui n'est pas très rassurant, mais tout à fait inéluctable à très long terme. Le cataclysme, sans cesse répété, *épisodique* (et surtout pas *périodique*, comme l'ont cru Raup et quelques autres chercheurs non astronomes), contingent, imprévisible, qui a amené très progressivement l'homme au sommet de la vie terrestre, appelle aussi obligatoirement son extinction pour un avenir encore indéterminé, mais qui pourrait être accéléré s'il devait y avoir un cataclysme d'envergure dans un avenir rapproché.

La leçon est dure à entendre : *il faudra laisser la place à d'autres*, c'est la règle, immuable, intangible, incontournable. Mais l'homme a quand même, depuis peu, une chance supplémentaire par rapport aux espèces précédentes, une chance unique, *s'il sait la saisir* : il pourra prolonger son existence s'il accepte de s'expatrier, comme nous le verrons au chapitre 20. La survie de l'homme à long terme passe par *l'impératif extraterrestre*.

Cette possibilité d'influer pour la première fois sur son destin, l'homme y accède seulement maintenant. Il aura fallu 4,6 milliards d'années et une contingence favorable pour nous permettre d'influer sur notre survie génétique, pour envisager avec quelques chances de réussite une nouvelle étape cosmique. Mais il ne faut pas se leurrer : nous ne sommes pas les premiers à atteindre ce niveau précosmique dans la Galaxie, et a fortiori ailleurs. Comme l'ont montré Francis Crick (1916-2004) et Leslie Orgel, d'autres civilisations plus anciennes et plus intelligentes ont déjà atteint depuis longtemps cette étape intermédiaire, et l'ont même dépassé de beaucoup en inséminant l'Univers *pour sauvegarder la vie et la propager*, à défaut de sauver des civilisations détruites par des cataclysmes cosmiques (explosion de supernova notamment) qui les dépassaient de beaucoup.

Cette chance unique qui est la nôtre aujourd'hui, sachons la saisir, car elle ne se reproduira pas. La conscience humaine, fruit d'une évolution sans cesse diversifiée et complexifiée, est un véritable cadeau. Je laisserai le dernier mot de cette section à S.J. Gould qui a, plus encore que tous les autres chercheurs, milité pour imposer l'idée que la vie n'a pas évolué d'une manière régulière et prévisible, mais au contraire que l'évolution a résulté d'une succession d'*innombrables événements fortuits* et que nous avons eu vraiment beaucoup de chance :

" Homo sapiens n'est pas arrivé sur la Terre - au cours de la dernière seconde, à l'échelle des temps géologiques - en raison d'un progrès biologique ou d'une augmentation de la complexité neuronale prévue par la théorie de l'évolution, mais plutôt parce qu'il était l'aboutissement contingent et fortuit de milliers

d'événements interdépendants. Chacun d'eux aurait pu se produire différemment et mettre l'évolution sur un autre chemin où la conscience ne serait pas apparue. " (18)

On ne peut être plus clair. L'homme est l'aboutissement *contingent et fortuit* de milliers d'événements interdépendants. La conclusion s'impose d'elle-même : *la vie et la conscience extraterrestres ne peuvent être que très différentes de celles qui sont les nôtres. Mais les ingrédients de base sont les mêmes, partout, depuis toujours. Le cataclysme est un outil parmi d'autres de diversification, et aussi de complexification* (19).

L'homme et la sixième extinction de masse

L'autre conclusion est tout aussi évidente : *l'homme est maintenant capable de prendre sa part dans l'évolution et l'extinction*. Depuis 1945, avec Hiroshima et Nagasaki, on sait avec certitude et inquiétude que l'homme peut se détruire lui-même totalement, et donc sans espoir de retour. L'extinction ne fait jamais marche arrière. Elle est irréversible.

Si la raison semble (provisoirement ?) l'emporter à ce niveau du catastrophisme technologique (et militaire), tous les chercheurs qui se consacrent aux sciences de la nature le savent bien : la sixième extinction de masse (20) ne sera pas due à un impact d'astéroïde ou de comète, elle sera due à l'homme, et elle a déjà commencé. On ne compte plus les espèces décimées, même parmi les mammifères et autres grands animaux. Sans remonter au mammoth (21/22), plusieurs espèces qui auraient pu être sauvées sont passées à la trappe, à cause de la folie des hommes qui ne privilégient souvent que leur propre quotidien, et non parce que c'était une nécessité. C'est aussi cela la contingence et surtout son côté nocif.

Avec l'homme, dominateur de la nature et provisoirement *propriétaire* de sa planète, il n'est pas si sûr que les espèces se renouvellent dans des conditions identiques à celles qui prévalaient quand nos prédécesseurs n'étaient que des *locataires parmi d'autres* (23). L'évolution et l'extinction sont bel et bien rentrées dans une période charnière qui pourrait se transformer rapidement en une période critique, si les valeurs économiques s'imposent définitivement aux valeurs écologiques et plus largement humaines (24).

Notes

1. L'échelle taxinomique du monde vivant se compose de deux *règnes* : le règne animal et le règne végétal. Chaque *phylum* (ou *embranchement*) est composé de plusieurs classes ; chaque *classe* est composée de plusieurs ordres ; chaque *ordre* est composé de plusieurs familles ; chaque *famille* est composée de plusieurs genres ; chaque *genre* est composé de plusieurs espèces ; chaque *espèce*, caractérisée par la "barrière chromosomique", qui interdit la reproduction non stérile entre des espèces différentes, est

composée d'une multitude d'individus. L'espèce est donc déjà le sixième niveau de la hiérarchie du phylum.

2. D.M. Raup, *De l'extinction des espèces* (Gallimard, 1993). Titre original : *Extinction. Bad genes or bad luck* (1991). Un livre essentiel pour comprendre l'extinction et ses divers problèmes.

3. Collectif, *La théorie de l'évolution*, Dossier hors-série n° 27, Science et Vie Junior, 1997. A noter surtout le dernier article : E. Julien, *De quoi meurent les espèces ?*, pp. 106-113, qui recense les causes principales des extinctions. Le cataclysme figure en bonne place comme moteur d'extinction et donc de régénérescence. Texte de Jean-Jacques Jaeger cité p. 107.

4. C. Lyell, *Principles of geology* (1830-1833). Ouvrage en trois volumes. Voir le livre de S.J. Gould, *Aux racines du temps* (Grasset, 1990), pour mieux connaître ce savant anti-catastrophiste qui poussa Cuvier aux oubliettes.

5. C. Darwin, *L'origine des espèces* (La Découverte, 1985). Le classique de Charles Darwin est paru en 1859 sous le titre : *On the origin of species by means of natural selection*.

6. N. Eldredge and S.J. Gould, *Punctuated equilibria : An alternative to phyletic gradualism* (pp. 82-115), dans T.J.M. Schopf (ed.), *Models in Paleobiology* (Freeman, Cooper & Co, 1972).

7. Collectif, *L'évolution*, Dossier hors-série n° 14, Pour la Science, 1997. Un hors-série de 146 pages qui contient 27 articles sur l'évolution et ses mécanismes, dans lequel il y a beaucoup à apprendre.

8. V.L. Sharpton and P.D. Ward (eds), *Global catastrophes in Earth history* (Geological Society of America, 1990). Ce livre contient les contributions d'un colloque sur l'extinction qui s'est tenu en octobre 1988.

9. La stérilité des mâles, consécutive à une augmentation des radiations cosmiques, pourrait être une cause de la disparition d'espèces fragilisées.

10. S.J. Gould, *La vie est belle. Les surprises de l'évolution* (Seuil, 1991).

11. S.A. Haines, *L'holocauste des dinosaures*, dans *Les grandes catastrophes*, Science et Vie, HS 144, 1983. Citation p. 32.

12. D. Russell, *Les extinctions massives à la fin du Mésozoïque*, Pour la Science, 53, pp. 44-52, 1982. Citation p. 52.

13. J.-L. Hartenberger, *La grande coupure*, Pour la Science, 67, pp. 26-38, 1983.

14. Historia Spécial, *Les origines de l'homme*, HS 50, novembre-décembre 1997. Un dossier avec 26 articles sur l'origine de l'homme et la Préhistoire.

15. Voir la partie *Les mécanismes de l'évolution* du Dossier pour la Science, *L'évolution* (note 7).
16. *La Terre bombardée*, p. 203.
17. Texte de S.J. Gould, cité dans L. de Bonis, *Contingence et nécessité dans l'histoire de la vie*, Dossier Pour la Science, *L'évolution* (note 7), p. 24, 1997.
18. S.J. Gould, *L'évolution de la vie sur la Terre*, Pour la Science, 206, pp. 90-98, 1994.
19. T.X. Thuan, *Origines. La nostalgie des commencements*, Gallimard, 2006. Dans son livre, Trinh Xuan Thuan explique que les astéroïdes ont été un agent très important de la contingence, notamment l'impact qui a créé la Lune. Il a écrit ceci : "*Cette collision de notre planète avec un gros bolide relève du domaine de l'aléatoire, de la contingence : elle n'est pas inscrite de manière fondamentale dans les lois de la nature.*" (p. 208).
20. R. Leakey et R. Lewin, *La 6^{ème} extinction* (Flammarion, 1997). Titre original : *The sixth extinction* (1995). En français, ce livre est sous-titré : *Évolution et catastrophes*. Il met clairement en évidence la menace que l'homme lui-même fait peser sur une multitude d'espèces fragiles qui ne survivront pas à l'industrialisation forcenée de la planète, notamment à la *déforestation* de vastes régions jusque-là préservées comme l'Amazonie ou l'Indonésie qui fait reculer à très grande vitesse la biodiversité régionale.
21. C. Cohen, *Le destin du mammouth* (Seuil, 1994).
22. A. Foucault, *Des mammouths et des hommes*, Vuibert, 2005. Un livre écrit par un géologue, spécialisé dans l'étude des variations du climat et de l'environnement.
23. Y. Paccalet, *Le grand roman de la vie*, JC Lattès, 2009.
24. V. Aubert, *Les catastrophes qui nous menacent*, Éditions du Rocher, 2008. Dans son livre, Vianney Aubert recense toutes les catastrophes qui nous menacent. Aux cataclysmes terrestres comme les volcans, les séismes et les tsunamis, s'ajoutent des cataclysmes purement humains comme les épidémies, la surpopulation et son corollaire : l'épuisement des ressources naturelles, auxquels s'ajoute évidemment la menace technologique, et en particulier les centrales nucléaires. Sur la quatrième de couverture, on lit : « *La montée des périls est telle que, pour la première fois, des scientifiques osent sérieusement envisager la fin possible de l'humanité.* »

CHAPITRE 16

LA VIE ET LA MORT VIENNENT DU COSMOS

Dans ce chapitre, il est question de plusieurs aspects, quelque peu hétéroclites, des rapports de la Terre avec la vie et la mort en provenance du cosmos, dont je n'ai pas encore parlé, ou qui ont été seulement survolés dans certains des chapitres précédents. J'examine aussi quelques hypothèses astronomiques qui se rapportent à ce vaste sujet.

Conséquences biologiques de l'impactisme

Si la Terre, comme les autres planètes d'ailleurs, n'est pas un astre fragile en dépit des innombrables catastrophes qui de tout temps ont modelé et remodelé sa surface, la vie qui s'est progressivement développée sur cette surface est sérieusement tributaire, elle, de l'environnement. Cette vie a dû souffrir à de fréquentes reprises, disparaître partiellement et peut-être même totalement à la suite de cataclysmes d'origine cosmique de grande envergure. L'homme actuel est encore menacé lui aussi, à court et à long terme, par les conséquences de nombreux cataclysmes probables ou potentiels (1/2), aussi bien terrestres d'ailleurs qu'astronomiques.

Dans *La Terre bombardée* de 1982, j'écrivais ceci au chapitre IX :

" Nous allons étudier dans ce chapitre certaines conséquences biologiques et humaines de l'impactisme. Elles sont si importantes que l'on peut dire d'ores et déjà que la vie en général, et l'homme en particulier, sous leurs formes actuelles, ne sont que des *sous-produits* de l'impactisme terrestre, contrairement à ce qui se passe sur la planète Mars, par exemple, où l'impactisme est probablement l'obstacle numéro 1 à l'apparition ou au maintien de la vie. En d'autres termes, nous affirmons que *le catastrophisme d'origine cosmique est l'un des moteurs essentiels de l'évolution*. Conclusion qui fera bondir de nombreux scientifiques de notre époque, notamment ceux qui connaissent mal le volet astronomique du problème, mais à coup sûr évidence de demain.

Les preuves, arguments et corrélations que nous allons soumettre au lecteur laissent peu de place à l'erreur de diagnostic, et se boucher éventuellement les yeux pour ne pas voir l'aveuglante réalité ne serait qu'un signe de peur ou d'obscurantisme d'un autre siècle. La science évolue et rien n'est en mesure de l'arrêter. A temps nouveaux, arguments nouveaux et hypothèses nouvelles, quoi de plus logique ? " (3)

Il est bien clair aujourd'hui que l'évolution ne concerne pas seulement les sciences de la vie. Elle a des rapports étroits avec les sciences de la Terre et surtout avec les sciences de l'espace. Que le catastrophisme d'origine cosmique soit *l'un* des moteurs de l'évolution est une évidence, quasi acceptée par tous les chercheurs qui lisent la presse scientifique en général, et pas seulement leurs revues spécialisées. La multidisciplinarité est indispensable pour comprendre le problème de l'évolution dans sa globalité. L'association entre les diverses disciplines est obligatoire.

D'énormes progrès ont été enregistrés dans ce domaine, grâce surtout aux recherches sur la mort des dinosaures tout au long des années 1980, et évidemment les résultats ont suivi, des résultats inespérés, qui vont tous dans le même sens et qui ont permis à une nouvelle génération de chercheurs de s'imposer et de faire l'actualité. Il est sûr que les pionniers ont du mal à se faire entendre et reconnaître, même s'il s'agit de savants de l'envergure de Hoyle ou Crick, et les précurseurs des années 1950 et 1960 sont déjà oubliés. Mais leurs écrits restent, et il est à souhaiter que les historiens des sciences de l'avenir leur rendent le mérite qui leur est dû. Ils ont été à la base d'une grande (et irréversible) révolution scientifique.

Le danger cosmique est multiforme, quasi insaisissable, souvent même totalement invisible quand il s'agit de radiations. Mais le cosmos n'est pas que danger et mort. Il est aussi source de vie avec ce Soleil sans qui nous n'existerions pas, et qui permet à notre biosphère d'être accueillante pour tous ces êtres vivants qu'elle a façonnés, pièce par pièce, depuis plus de trois milliards d'années. Cette biosphère aujourd'hui menacée *pour la première fois* depuis qu'elle est viable par la plus sophistiquée de ses créatures, qui est devenue un prédateur menaçant, l'homme.

La biosphère, siège de la vie terrestre

On considère en général la biosphère comme étant la partie de l'écorce terrestre et de l'atmosphère où il existe une *vie organique*. Cette notion de biosphère est relativement récente puisqu'elle a été réellement mise en évidence à partir des années 1920 seulement, notamment par le biochimiste soviétique Vladimir Vernadsky (1863-1945) qui en a défini le concept et les principaux critères dans son livre *La biosphère* (4) paru en 1926. Vernadsky, qui était contemporain de Oparine et Haldane, les deux autres grands biochimistes de cette époque (qui ont travaillé sur l'origine de la vie et sur l'atmosphère primitive de la Terre), s'est rendu compte de l'importance pour la vie de cette fine enveloppe qui donne à la Terre son unicité. Tant et si bien qu'on le considère souvent comme le père de l'écologie.

Vernadsky insistait sur l'importance des rayonnements venus de l'espace :

" La Terre reçoit de tous les points des espaces célestes un nombre infini de rayonnements divers, dont les rayonnements lumineux visibles pour nous ne forment qu'une part insignifiante. "

Il mit aussi en évidence les rapports très étroits de la biosphère avec *l'environnement cosmique* de notre planète. :

" La biosphère peut, de par son essence, être considérée comme une région de l'écorce terrestre, occupée par des transformateurs qui changent les rayonnements cosmiques en énergie terrestre active, énergie électrique, chimique, mécanique, thermique, etc. Les rayonnements cosmiques qui jaillissent de tous les astres célestes embrassent la biosphère, la pénètrent toute, ainsi que tout ce qui se trouve en elle...

L'étude de l'action des radiations solaires sur les processus terrestres nous permet déjà d'envisager la *biosphère* en première approximation, d'une manière scientifiquement précise et profonde, *comme un mécanisme à la fois terrestre et cosmique*. Le Soleil a complètement transformé la face de la Terre, transpercé et pénétré la biosphère. Dans une large mesure, la biosphère est la manifestation de ses rayonnements ; c'est un mécanisme planétaire qui convertit ceux-ci en des formes nouvelles et variées d'énergie terrestre libre, énergie qui change entièrement l'histoire, ainsi que la destinée de notre planète. "

Depuis les travaux de Vernadsky, d'innombrables études ont été faites sur la biosphère (5), que l'on connaît très en détail aujourd'hui et que l'on sait d'une extrême fragilité. Bien entendu, comme le savait déjà Vernadsky et les astronomes de son époque, elle est totalement sous la coupe du Soleil, le maître absolu de notre petit secteur cosmique.

La biosphère étant le *domaine de la vie*, comme l'expliquait avec beaucoup de sagesse Vernadsky, qui prêchait pour que les hommes la respectent (il ne fut pas toujours écouté !), il est nécessaire d'en connaître avec précision les différents constituants susceptibles d'être les victimes directes ou indirectes d'agressions cosmiques inhabituelles.

L'hypothèse Gaïa ou la Terre est un "système"

Vernadsky pensait que la biosphère était un "mécanisme" à la fois terrestre et cosmique. Longtemps après lui, certains scientifiques ont cru pouvoir affirmer, avec des arguments plus ou moins crédibles, que la Terre est un "système" capable de *créer* et de *contrôler* tous ses paramètres et de *s'adapter* en fonction de paramètres extérieurs imposés par le Soleil et autres corps cosmiques, étant entendu que notre planète n'est qu'un système minuscule parmi des milliards d'autres équivalents dans l'Univers.

C'est l'hypothèse *Gaïa*, hypothèse culte des écologistes, due au biologiste et cybernéticien anglais James Lovelock qui la proposa pour la première fois en 1969 (6). On sait qu'elle est très sérieusement contestée par une majorité de géophysiciens et autres spécialistes des sciences de la Terre, qui n'y voient qu'une élucubration sans fondement. Par contre, elle reste très populaire

dans les milieux écologistes non scientifiques, qui trouvent avec elle, au contraire, un moyen efficace de sensibilisation contre tous les excès de pollution et de lutte globale au niveau de la planète. En effet, Lovelock a clairement démontré qu'en trois siècles seulement, l'humanité a davantage modifié le visage de la Terre que l'évolution naturelle (catastrophes exclues) en des centaines de milliers d'années. Ce qui est vrai. Mais pour ce qui est de la valeur de l'hypothèse prise d'une manière globale, à savoir le caractère "vivant" de la Terre, la vérité est intermédiaire entre les deux affirmations extrêmes, et il est donc nécessaire de préciser ce dont il s'agit.

Dans son approche maximaliste (qui a encore quelques supporters, qui ne sont que d'indécrottables géocentristes), la Terre est une entité *volontaire*, qui gère elle-même au gré de ses exigences un climat et une atmosphère qu'elle s'est confectionnés. Lovelock a toujours répété son credo : " *La Terre est vivante* ", ce dont personne ne doute d'ailleurs. Il reste à savoir à quel niveau ! Selon lui, notre planète est un *être vivant* ayant une individualité propre, un super organisme qui s'est forgé un environnement sur mesure, un "système" auto-régulé dont les éléments biologiques interviennent régulièrement pour maintenir une stabilité assurant la survie.

Les anti-Gaïa répondent, au contraire, qu'il est tout à fait impossible que la biosphère, qui n'est qu'une infime partie de notre globe, puisse commander les phénomènes terrestres. Mais quelques observations passées semblent contredire partiellement cette réponse péremptoire dans la mesure où l'on sait, par exemple, que c'est grâce aux végétaux marins (des membres de la biosphère) que l'atmosphère primitive réductrice s'est progressivement enrichie en oxygène pour permettre à la vie de s'installer, et surtout de se diversifier et de se complexifier, il y a deux milliards d'années.

En fait, le dilemme entre pro et anti-gaïens repose sur l'importance de l'impact que peut avoir la vie sur les conditions qui règnent sur la Terre. Quasiment tous les scientifiques admettent que la Terre est bien un "système" qui a une importante capacité d'auto-organisation et d'auto-régulation. La Terre et sa biosphère, comme la vie, ont en temps normal une *évolution gradualiste*, tout à fait conforme à ce que l'on est en droit attendre dans un système non perturbé. Mais dès que ce système est soumis à des anomalies de parcours (impact cosmique, inversion géomagnétique, impactisme particulière, volcanisme important...), les conditions deviennent provisoirement catastrophistes, et même parfois carrément *mutagènes* pour certains de ses composants vivants.

Les scientifiques ont vite compris que la grosse faiblesse de l'hypothèse de Lovelock et de ses adeptes (on peut parler de disciples pour certains d'entre eux), est de très mal s'accorder aux grands changements climatiques qui ont, si souvent à l'échelle géologique, affecté notre planète. Ainsi, comme l'ont fait remarquer certains adversaires de l'hypothèse :

" Gaïa, la déesse "thermostat", la puissance régulatrice garante de l'équilibre global, n'a pas pu empêcher les quatre glaciations

du Quaternaire. Or les ères glacières n'étaient pas dues à des circonstances extérieures, telles qu'une diminution du rayonnement solaire, mais à des causes proprement terrestres qui ont déstabilisé notre climat. " (7)

La Terre n'est, en effet, nullement en mesure de faire face aux variations climatiques d'ampleur astronomique (telles que prévues par Milankovic), qui sont du seul ressort de la mécanique céleste, gigantesque mécanique dans laquelle la Terre et les autres planètes (même Jupiter et Saturne) sont des instruments dociles, en aucune manière capables d'interférer.

Tant et si bien que, face aux arguments scientifiques et aussi de bon sens de ses nombreux contradicteurs, Lovelock est passé de l'hypothèse maximaliste des années 1970, qui virent la montée en flèche de son hypothèse, à une hypothèse "basse" (un peu tristounette) pour sauvegarder un minimum de crédibilité dans le monde scientifique et aussi certains adeptes. Dans sa version haute, l'hypothèse Gaïa est quasiment religieuse, donc antiscientifique, mais dans sa version basse (qui existait bien avant Lovelock), elle est acceptable puisque tout le monde est bien d'accord pour admettre que la Terre est un "système", et qu'elle présente donc bien certaines caractéristiques de régulation interne.

Contrairement à ce que prétend Lovelock, c'est la vie qui doit s'adapter à la Terre et non l'inverse. Cette Terre qui existait déjà bien avant la vie et qui, n'en doutons pas, lui survivra de beaucoup.

Les colères du Soleil

Il est incontestable que notre étoile, qui est notre principale source de vie, reste aussi, de loin, l'astre le plus menaçant pour l'espèce humaine, même si ses colères semblent relativement rares à notre échelle. On n'a pas dans toute l'histoire de l'humanité de traces indiscutables d'une activité solaire vraiment anormale, même si l'on sait que certaines éruptions ont été exceptionnelles de par l'énergie dégagée.

Mais le Soleil est bel et bien, malgré tout, les astronomes le savent, *une étoile légèrement variable*, avec tout ce que cela comporte comme dangers à moyen et surtout à long terme (8). En période normale, il est un formidable et inépuisable fournisseur de rayonnements de toute nature, comme nous l'avons vu au chapitre 8.

Nous allons voir successivement les principaux dangers pouvant provenir de notre étoile et les conséquences biologiques qui en découlent.

En période normale (dite de Soleil calme), il n'y a rien de particulier à signaler. Les éruptions solaires font partie de la vie quotidienne de notre étoile. Le rayonnement solaire ordinaire maintient l'ionosphère terrestre, couche située entre 80 km et 500 km, dans un état d'ionisation partielle, la magnétosphère terrestre intercepte la grande majorité des rayonnements

nocifs. Contrairement à ce que croient certains, les légères variations du rayonnement solaire n'ont pas d'effet significatif particulier sur la météorologie, pas plus, semble-t-il que sur le climat.

Lors de très fortes éruptions solaires et de l'expulsion d'un vent solaire particulièrement énergétique (voir le chapitre 8), les choses sont un peu différentes. De brusques décharges d'énergie peuvent atteindre 10^{25} joules et le plasma, composé de protons, d'électrons et de noyaux d'hélium, et une vitesse de plus de 1000 km/seconde. Au niveau de la Terre, cela se traduit par des orages magnétiques capables de perturber très sérieusement l'ionosphère, sans pour autant se révéler réellement dangereux pour la vie.

Au niveau biologique, il a été relevé qu'en période de forte activité solaire, liée au fameux cycle d'environ onze ans, une corrélation certaine existe entre le nombre de Wolf (nombre de taches) et la croissance des arbres. Cela signifie une croissance accélérée liée à l'activité solaire, mais on peut assimiler ce phénomène à une évolution *gradualiste*, tout à fait normale, et en aucun cas à un phénomène catastrophiste.

Pour atteindre ce niveau quasi catastrophiste, il faudrait une protubérance solaire géante (non encore observée à l'échelle humaine, mais plausible à l'échelle géologique) qui projetterait dans l'espace, suite à un phénomène solaire interne particulièrement énergétique, un plasma dont l'énergie serait suffisante pour forcer le "paravent" que constitue la magnétosphère et détruire la couche d'ozone.

On s'est aussi posé la question de savoir, suite à des observations remontant parfois à quelques siècles, si le diamètre du Soleil était constant et les conséquences qui découleraient d'une variation, en plus ou en moins, ce diamètre. Entraînerait-elle une augmentation ou une diminution de l'énergie diffusée dans l'espace, et en conséquence une variation de la température incidente reçue à la surface terrestre ? Quelles conséquences *biologiques* entraînerait une variation d'une dizaine de degrés ?

Enfin, il faut signaler que, pour les astrophysiciens pour une fois unanimes, le risque que le Soleil se transforme un jour en nova n'existe pas et peut être totalement écarté. Son avenir, on le sait depuis longtemps, est une transformation progressive, dans plusieurs milliards d'années, en géante rouge, mais d'ici là la vie aura totalement disparu de la Terre.

Conclusion de cette section : en fait, en période normale et à l'échelle humaine, le Soleil est plus un "ami" qu'un ennemi, ce qui semble assez logique dans la mesure où la vie n'existe que grâce à lui. La vie terrestre est entièrement acclimatée à la biosphère, elle-même inféodée au Soleil. Quelques petites perturbations (petites au niveau terrestre) dans la magnétosphère, l'atmosphère, le climat ne remettent nullement en cause la pérennité de la vie et celle de l'évolution gradualiste. La destruction de la couche d'ozone peut, par contre, entraîner des désagréments particuliers comme nous le verrons plus loin.

Si le Soleil est un "ami" indispensable en période normale, il en va tout autrement quand, au niveau terrestre (et à l'échelle géologique), le mécanisme se grippe.

Inversions géomagnétiques et évolution

Le danger, sinon mortel du moins *mutagène*, arrive surtout avec une diminution significative, et à plus forte raison la disparition, du champ magnétique. La magnétosphère terrestre ne fait plus son travail de paravent et de soupape et peut disparaître totalement. Conséquence immédiate, la couche d'ozone, elle aussi, diminue ou disparaît totalement, les radiations cosmiques, principalement solaires mais aussi galactiques (rayons cosmiques), atteignent la surface terrestre.

C'est alors la catastrophe, tout au moins pour les espèces autochtones. Par contre, pour la vie en général, cela va être une *période* et un *moyen* de se régénérer. L'évolution va pouvoir passer à la vitesse supérieure. L'évolution *catastrophiste* va provisoirement se superposer à l'évolution *gradualiste* darwinienne, *la complexité va gagner quelques "points" précieux*, de nouvelles espèces vont apparaître (9), bien armées pour supporter la nouvelle donne environnementale.

Comme je l'ai dit au chapitre 15, *c'est le bruit de fond de l'extinction*, prémisses elle-même à une nouvelle étape, à un nouveau départ, à une complexité accrue à moyen terme. C'est le rituel immuable depuis que la vie existe. *La vie et la mort viennent bien du cosmos.*

Ce problème des inversions géomagnétiques est un sujet très important, de par ses conséquences cruciales sur l'évolution des êtres vivants, qui est étudié par des équipes de spécialités différentes. Pour autant, les causes des inversions, qui doivent être multiples, restent mal connues. Sont-elles externes, internes, ou les deux ? En 1982, dans *La Terre bombardée*, je tablais résolument pour des causes à la fois externes et internes. Aujourd'hui, force est de constater que la grande majorité de ces inversions doivent être en fait à d'importantes perturbations liées au noyau terrestre (10) et donc principalement d'origine terrestre.

Mais les questions restent nombreuses et souvent sans réponse. On peut en citer deux, concernant des hypothèses dont il serait urgent de savoir si, oui ou non, elles restent crédibles, les avis différant selon les scientifiques concernés :

1. " *Un impact d'astéroïde ou de comète important peut-il inverser le champ magnétique ?* "
2. " *Quel est le rôle du chaos dans certaines de ces inversions ?* " (11).

La couche d'ozone et l'impactisme

L'impactisme particulière a aussi, à certaines époques, des effets significatifs sur un constituant primordial de notre atmosphère : la *couche d'ozone* (12) qui s'étend entre 20 et 30 km d'altitude. L'ozone est un gaz formé par l'association de trois atomes d'oxygène qui a la particularité, fort importante pour la vie terrestre, de filtrer le rayonnement ultraviolet du Soleil dont on connaît les effets particulièrement nocifs. Il n'est pas sûr que cette couche d'ozone résiste bien à des agressions exceptionnelles, comme par exemple l'arrivée massive de rayonnements causés par des éruptions solaires cataclysmiques ou à des explosions de novae ou de supernovae, voisines (relativement) de la Terre, qui éjectent dans l'espace des quantités fantastiques de matière et de rayons cosmiques. On pense, en effet, que des flux très importants de protons sont capables d'entraîner une diminution de la concentration d'ozone.

Et maintenant, on soupçonne l'homme lui-même, du fait de certaines de ses activités, de détruire involontairement la couche d'ozone. On connaît le problème de l'apparition du fréon dans la basse atmosphère, un gaz qui n'existe pas à l'état naturel et qui est dû à l'utilisation des bombes aérosols, des systèmes réfrigérants et des climatiseurs. Ce fréon est un ennemi mortel pour l'ozone, puisqu'il se décompose pour former du chlore qui après combinaison avec l'ozone entraîne sa dissociation.

D'autres ennemis ont été recensés depuis longtemps, notamment l'aviation stratosphérique et, bien sûr, les explosions nucléaires dans l'atmosphère (heureusement en voie de disparition). L'ozone est ainsi menacée à la fois par la Terre et par l'espace, et elle n'est le fruit (indispensable mais provisoire) que d'un équilibre fort délicat, souvent mis à mal probablement, avec toutes les conséquences biologiques qui en découlent.

Rayons cosmiques : rayons de mort et/ou de vie ?

L'influence du bombardement des rayons cosmiques sur les êtres vivants a toujours passionné les biologistes, et de nombreuses études ont été faites à ce sujet (13). On a constaté des modifications sur des cultures de bactéries, sur des œufs de différentes espèces animales et même sur des animaux cobayes exposés à des "averses cosmiques" comme on les appelle. Il est certain que des *mutations génétiques* ont été observées et que des cancers ont affecté diverses parties du corps des animaux irradiés.

On comprend le danger énorme pour la vie chaque fois que la Terre reçoit une exposition prolongée de rayons cosmiques. C'est le cas, ne l'oublions pas, quand notre planète perd la protection de son bouclier magnétique, lors des *inversions géomagnétiques*. Rappelons que les périodes d'annulation durent plusieurs milliers d'années et que chacune d'elles est la cause de la

disparition de certaines espèces et de l'apparition de nouvelles espèces *mutées*, consécutivement aux radiations accrues. L'organisme humain souffrira gravement de la prochaine averse de rayons cosmiques. Ce sera d'ailleurs la première fois que notre espèce, *Homo sapiens*, sera confrontée à un tel danger. La multiplication des cancers de la peau notamment est à craindre, ainsi que des leucémies, le tout couronné par une stérilité probablement accrue qui pourrait s'avérer catastrophique pour la survie de l'espèce, tout au moins sous sa forme actuelle.

De toute évidence, l'amélioration de l'espèce humaine est loin d'être acquise pour l'avenir, une stérilité accrue pourrait même être *source de récession*. Tant et si bien que des chercheurs actuels croient possible le fait que les premiers *Homo*, loin de descendre du singe, ou d'un ancêtre commun (le fameux maillon manquant), pourraient avoir engendré eux-mêmes certaines espèces de singes supérieurs qui sont très proches de nous génétiquement. On sait, par exemple, que le chimpanzé, notre plus proche "cousin", partage avec nous plus de 97 % du même programme génétique, ce qui indique clairement une "séparation" définitive il y a très peu de millions d'années.

Certains auteurs ont parlé aussi de sénilité et de débilité accélérées, d'autres de gigantisme sans avenir. Le pire, c'est que les scientifiques sont totalement désarmés face à cette catastrophe qui les dépasse de beaucoup, et qui peut être, nous l'avons vu, d'origine purement terrestre, mais aussi parfois consécutive à un impact sérieux d'un astéroïde ou d'une comète sur la Terre. Elle est fréquente à l'échelle astronomique, puisque se produisant en moyenne tous les 500 000 ans. Cela signifie que déjà des millions d'espèces terrestres ont eu à souffrir de ses effets depuis l'apparition et la fixation définitive de la vie sur Terre.

On se demande vraiment ce que pourrait être le moyen de parade à la prochaine "averse cosmique". Le mieux serait évidemment de capter, au moins partiellement, ce flux cosmique de très grande énergie et de l'utiliser justement comme une nouvelle source d'énergie perpétuellement disponible. Inutile de dire que la technique humaine n'en est pas encore là, il s'en faut même de beaucoup, et que quelques centaines, ou même milliers d'années, ne seront sans doute pas de trop pour mettre au point la théorie adéquate. Cela vaut quand même la peine d'y penser sérieusement, car la survie de l'espèce humaine *sous sa forme actuelle* est peut-être à ce prix.

Par contre, en période normale comme actuellement, les rayons cosmiques ne sont plus des " *rayons de mort* ", mais probablement, au contraire, des " *rayons de vie* ". A petite dose, ils favorisent la croissance des êtres vivants. Leur absence totale déboucherait sans doute sur des effets plus ou moins nocifs, notamment en stoppant ou en retardant tout développement de la vie. Cette absence serait en tout cas un frein pour la montée inexorable vers une complexité accrue des formes vivantes, qui est une nécessité au niveau de l'Univers en général, comme nous l'avons vu au chapitre 14.

Le physicien suisse Jakob Eugster (1891-1974), qui fut l'un des grands spécialistes des rayons cosmiques, a fait, à ce sujet, dans les années 1960, ce commentaire qui est probablement exact :

" L'exposition aux rayons cosmiques sur la Terre favorise la croissance. Un bombardement de particules primaires dans l'espace peut provoquer des dégâts, spécialement s'il est intense et continu, mais l'absence de radiations influence négativement les organismes vivants en arrêtant ou en retardant tout développement. *Peut-être les rayons cosmiques sont-ils aussi nécessaires que la lumière.* " (14)

On peut espérer une nette amélioration de nos connaissances à ce sujet au XXI^e siècle. Ce sera une très bonne chose, car les rayons cosmiques sont un composant de l'Univers présent partout depuis toujours, extraordinairement énergétique, et donc très important, encore bien mal connu dans le détail.

Les comètes, source de vie et de mort ?

J'ai déjà partiellement répondu à cette question dans d'autres chapitres. Au chapitre 14, nous avons vu l'importance que certains chercheurs, comme Hoyle, Wickramasinghe, Delsemme, Crick et d'autres, apportent aux comètes comme facteur d'introduction de la vie sur Terre. Au chapitre 12, nous avons vu qu'une comète pourrait fort bien avoir été la cause du cratère de Chicxulub et de l'extinction de masse qui a suivi. Au chapitre 19, j'étudierai l'aspect historique du problème avec les résidus de Hephaistos, l'objet cosmique le plus préjudiciable depuis l'arrivée d'*Homo sapiens* et qui lui a causé déjà beaucoup de misères, en très grande partie non encore identifiées.

Il est indéniable que les comètes sont des petits corps dont on a jusqu'à maintenant nettement sous-estimé l'importance. Elles existent par milliards dans le Système solaire, mais aussi en nombre illimité dans les espaces interstellaires. Par le jeu des perturbations stellaires, on sait que certaines de "nos" comètes peuvent prendre leur indépendance suite à des perturbations (grâce à des orbites hyperboliques) et partir dans la Galaxie à la recherche d'une nouvelle étoile qui les capturera et en fera des (mini) satellites. Ainsi *la vie et la mort sont des denrées exportables (et réciproquement importables) à l'échelle astronomique, par le biais des comètes et des météorites (qui sont parfois des résidus de comètes).*

Pour ce qui est de leurs rapports directs avec la Terre, les comètes agissent en permanence sous deux formes successives. En tant que *comètes actives* dans un premier temps, avec une queue de gaz et de poussières qui peut jouer un rôle de balayage et d'introduction d'organismes prébiotiques, ou même carrément *vivants* parfois dans l'atmosphère terrestre. Elles jouent alors un rôle principalement positif : *elles véhiculent la vie.* En tant qu'*astéroïdes cométaires* dans un deuxième temps, quand les éléments

volatils et les glaces sont sublimés. Leur rôle alors pourrait être alors surtout négatif : elles participent à un impactisme destructif.

Dans un raccourci, peut-être un peu facile, on pourrait dire que la vie est apportée par des comètes et supprimée ensuite par des astéroïdes. Ce scénario pourrait, en particulier, s'être produit sur Mars, que l'on sait avoir été une planète vivante, avant que cette vie ne l'abandonne.

Nous allons voir que les choses sont en réalité bien plus complexes dans la section suivante consacrée à la panspermie microbienne.

La panspermie microbienne, vrai ou faux ?

Le balayage de la Terre par les queues cométaires

Le passage de la comète de Halley à proximité relative de la Terre au mois de mai 1910 a créé une sorte de panique dans les couches les moins instruites de la population. Camille Flammarion, le vulgarisateur bien connu de la science astronomique en France au début du XX^e siècle, expliquait dans plusieurs articles que la Terre allait être balayée et enveloppée pendant plusieurs heures par la queue de la comète, et que l'empoisonnement de l'humanité par des gaz délétères n'était pas exclu.

" La tête de la comète sera à 26 millions de kilomètres de nous. Or, les queues cométaires ont souvent 30, 40, 50 millions de kilomètre et davantage, et elles sont toujours opposées au Soleil. Cet immense appendice pourra donc nous atteindre, nous envelopper pendant plusieurs heures. Quelles seront les conséquences de cette rencontre, de cette immersion ?

Sans revenir sur l'exposé que j'en ai donné dans mon ouvrage *La Fin du Monde*, et sur toutes les formes qu'une rencontre cométaire avec notre séjour errant pourrait présenter aux divers points de vue mécanique, physique, chimique, thermodynamique, physiologique, nous pouvons avouer que nous ignorons la forme que le destin nous réserve pour le mois de mai prochain. L'empoisonnement de l'humanité par des gaz délétères n'est pas probable. Sans doute, si l'oxygène de l'atmosphère venait à se combiner avec l'hydrogène de la queue cométaire, ce serait l'étouffement général à bref délai. Si, au contraire, c'était une diminution de l'azote, une sensation inattendue d'activité physique serait éprouvée par tous les cerveaux, et la race humaine périrait dans un paroxysme de joie, de délire et de folie universelles, probablement, au fond, très enchantée de son sort. L'oxyde de carbone, au contraire, pourrait amener l'intoxication de tous les poumons. L'analyse spectrale ne nous indique pas encore quels éléments domineront dans la queue de la comète. Les combinaisons hydrocarburées de l'azote sont fréquentes. " (15)

En fait, le passage de cette queue cométaire dans notre atmosphère dans l'après-midi du 19 mai 1910 ne se traduit par aucune perturbation d'aucune sorte, notamment atmosphérique. Seules les personnes observant dans des conditions favorables purent déceler un crépuscule d'une splendeur inaccoutumée, rappelant ceux suivant les grandes éruptions volcaniques, comme celle, célèbre, du Krakatoa en 1883. Il est certain que des poussières très ténues, d'origine cosmique, se sont répandues dans l'atmosphère terrestre le 18 et 19 mai 1910, phénomène présentant une analogie singulière avec celui qui fut observé le 1^{er} juillet 1908, après l'explosion de la Toungouska dont j'ai parlé au chapitre 9.

Une authentique interaction entre l'atmosphère terrestre et la queue d'une comète s'était déjà produite quarante-neuf ans plus tôt, le 29 et le 30 juin 1861, période durant laquelle la Terre avait traversé la queue de la Grande comète de 1861, visible sur les deux tiers du ciel dans l'hémisphère sud. Ce phénomène remarquable eut, entre autres, comme témoin l'astronome français Emmanuel Liais (1826-1900), alors en mission en Amérique du Sud, qui écrivit ensuite à ce propos :

" La rencontre de la Terre par la queue d'une comète n'a rien qui doive effrayer... Aujourd'hui que nos connaissances en physique nous permettent d'apprécier l'extrême rareté du milieu gazeux qui forme les appendices cométaires, il est certain que, même quand ces gaz seraient délétères, la quantité mêlée à l'atmosphère serait trop petite pour nuire aux habitants de notre globe. " (16)

Ce premier passage authentique de la queue d'une comète à l'intérieur de l'atmosphère terrestre fut observé dans l'hémisphère nord (où la comète elle-même n'était pas visible) sous la forme d'une bande lumineuse large de 30 à 35°, dirigée exactement suivant la verticale et nettement plus lumineuse que la Voie Lactée, qui fut souvent prise pour une aurore boréale (17). Il n'y eut aucun effet biologique signalé. C'est la raison pour laquelle Flammarion, qui aimait bien "faire peur" à ses lecteurs, n'était pas vraiment inquiet pour le remake de 1910.

Aujourd'hui, la majorité des spécialistes sont d'accord pour affirmer que ces balayages de la Terre par des queues cométaires ne peuvent, *en aucun cas*, entraîner des désastres génétiques ou écologiques. Ces queues sont, en effet, d'une teneur si raréfiée (comme le savaient déjà les astronomes de 1860) que l'atmosphère terrestre est pratiquement du plomb en comparaison. Mais quelques auteurs sont d'un avis contraire et pensent que les queues cométaires, tout au moins certaines d'entre elles, pourraient être responsables de plusieurs épidémies *inséminées* sur la Terre depuis l'Antiquité. Ils rejoignent ainsi certains auteurs anciens qui tenaient la relation queue-de-comète / épidémie pour acquise.

Hoyle et Wickramasinghe et la panspermie microbienne

Aujourd'hui, les comètes ne créent plus la vie (tout au moins sur la Terre), mais elles pourraient bien, par contre, véhiculer la mort. Ce sont encore Hoyle et Wickramasinghe qui se trouvent à la base de cette hypothèse de la *panspermie microbienne* (18). Ces deux auteurs ont émis l'idée assez étonnante que certaines grandes épidémies de l'Antiquité et du Moyen Age, dont l'origine est toujours restée mystérieuse, pourraient avoir été provoquées par l'apport de germes pathogènes contenus dans des queues de comètes ayant eu une interaction avec l'atmosphère terrestre, au cours d'un passage à proximité relative de notre planète. Dans certains autres cas, ces germes pourraient provenir de débris cométaires récents essaimés le long de leur orbite par des comètes à courte ou longue période, et non encore détruits par les diverses radiations cosmiques.

Cette idée de panspermie microbienne n'est pas nouvelle en fait, contrairement à ce que l'on pourrait croire, et elle a été soupçonnée dès l'Antiquité, avant d'être reprise au XIX^e siècle par plusieurs auteurs (19). Tous les méfaits imputés aux comètes ont été recensés vers 1830 par un médecin anglais, Thomas Forster (1789-1850), dans son *Essai sur l'influence des comètes sur les phénomènes de la Terre*, quand l'astronome allemand Wilhelm Olbers (1758-1840) eut calculé que la comète D/Biela s'approchait à seulement 28 000 km de l'orbite terrestre et que, par conséquent, une interaction avec la queue de cette comète, et même une collision, n'était pas à exclure dans l'avenir. On sait que D/Biela se fragmenta peu après, en 1845, avant de se désintégrer et d'être la source des deux fantastiques *averses de Biélides* de 1872 et 1885 (voir le chapitre 10).

Il ne faut pas oublier que les comètes ont toujours été considérées avec crainte par les peuples anciens, et cela dans toutes les parties du monde, et le recensement du docteur Forster, qui peut paraître bien dérisoire (Arago s'est moqué de lui à l'époque), n'était que l'expression d'une inquiétude larvée face aux comètes, surtout après la très forte approche de D/Lexell en 1770 et la découverte du fait que D/Biela était sur ce qu'on appelle aujourd'hui une orbite de quasi-collision.

On peut mettre ce sentiment de peur sur le compte d'un obscurantisme millénaire, fléau dont certains ont encore du mal à se soustraire à l'époque présente. Mais ce serait peut-être voir les choses un peu trop sommairement. Car souvent des comètes ont été notées dans le ciel, alors que sévissaient des épidémies sévères, notamment la peste. C'est cette *présence simultanée* comète-épidémie qui les a fait associer dans l'esprit des peuples victimes et ce n'était peut-être pas toujours sans raison.

La question se pose donc ainsi sur le plan scientifique : " *Oui ou non l'arrivée dans l'atmosphère de matériaux cométaires peut-elle encore affecter la biologie terrestre ?* " Hoyle et Wickramasinghe postulent que ces invasions biologiques extraterrestres n'ont jamais cessé totalement et se poursuivent de nos jours. Ces invasions peuvent prendre la forme de nouveaux *virus* et

d'*infections bactériennes* qui frappent notre planète à des intervalles irréguliers et qui tombent au sol dans des poussières d'origine cométaire, ou à l'intérieur de matériaux météoritiques.

Les rapports sur des épidémies inexplicables sont légion dans l'histoire de nombreux pays. Elles sont toutes différentes, mais beaucoup ont des points communs. Elles débutent soudainement sans cause bien définie, elles affligent des villes entières et se propagent rapidement. Cependant, ces épidémies sont de courte durée, environ un an, et n'affectent jamais la population mondiale dans son ensemble. L'infection primaire pourrait venir du contact direct entre la poussière cométaire contaminée et les humains, ou passer par l'intermédiaire d'autres créatures comme les moustiques ou les rats. Ensuite, la transmission de personne à personne diminue sensiblement la virulence de la maladie qui finit par s'enrayer d'elle-même, non sans avoir fait, parfois, des milliers et même des millions de victimes.

Quoique l'hypothèse de ces épidémies d'origine cosmique soit plausible, et qu'elle ait été reprise dans les années 1970 par deux savants de stature mondiale, il faut cependant signaler qu'elle laisse sceptiques la grande majorité des chercheurs. Il faudra des preuves pour que la panspermie microbienne gagne ses lettres de noblesse dans l'éventail des théories scientifiques indiscutables. Il n'est pas exclu toutefois que ces preuves nous soient apportées dans un siècle futur par une nouvelle comète venue du fond du Système solaire et qui, par l'entremise d'un balayage de la Terre avec sa longue queue de poussières, déposera sur notre planète quelques virus pathogènes. Alors on pourra dire que les Anciens, pour craintifs qu'ils aient été, n'étaient pas aussi arriérés que l'on a trop voulu le laisser croire.

Hiver d'impact et hiver nucléaire

On peut regrouper dans une même section l'étude sommaire de l'hiver d'*impact* et celle de l'hiver *nucléaire*. On pourrait aussi leur adjoindre l'hiver *volcanique*. Ainsi on peut voir que l'espace, la Terre elle-même, et l'homme, phénomène transitoire créé à partir des deux premiers, sont tous les trois capables d'engendrer une période de turbulence très préjudiciable à la vie, sinon dans sa totalité, du moins à certaines espèces plus vulnérables et qui ne peuvent se maintenir qu'à l'intérieur d'une étroite fourchette de caractéristiques écologiques bien précises, notamment en ce qui concerne la composition de l'atmosphère, la température, etc.

Pour la Terre dans sa globalité, par contre, un hiver qu'il soit d'origine cosmique, volcanique (ou même peut-être humaine demain...), n'est qu'un épiphénomène banal, maintes fois répété dans son histoire, sans conséquence pour son intégrité en tant que planète. Pour la vie qu'elle abrite, bien sûr, c'est tout autre chose, et des remaniements, très partiels lorsqu'il s'agit d'impacts mineurs, ou quelquefois substantiels lorsqu'il s'agit d'impacts cataclysmiques, sont inévitables.

Ce sont Luis et Walter Alvarez qui ont créé la notion d'hiver d'impact quand ils prirent conscience que l'excès d'iridium dans la couche K/T était lié à un impact cosmique d'envergure. L'astéroïde ou la comète de 10 km responsable de la fin du Crétacé a eu des conséquences très importantes sur la biosphère, comme je l'ai expliqué au chapitre 12. D'une manière plus globale, l'hiver d'impact se produit chaque fois que l'impacteur a un diamètre moyen de 2,0 km.

Dans la foulée de cette découverte importante, d'autres chercheurs, scientifiques et militaires, y ont associé la notion d'*hiver nucléaire*, aujourd'hui classique, et qui est caricatural du catastrophisme *technologique* par ses causes et *écologique* par ses conséquences. Un livre à succès est paru sur le sujet en 1984 sous la signature commune de quatre scientifiques américains : *The cold and the dark*, en français *Le froid et les ténèbres* (20).

Les nombreuses simulations informatiques, dont les scientifiques de toutes les spécialités sont friands et de grands consommateurs, effectuées sur ce sujet particulièrement sensible, ont montré que les conséquences d'une explosion nucléaire de très grande envergure (l'hiver nucléaire) et celles résultant de l'impact d'un objet cosmique de plusieurs kilomètres de diamètre (l'hiver d'impact) étaient assez comparables.

On peut résumer ainsi le scénario de base. La poussière propulsée dans l'atmosphère obscurcit l'atmosphère d'une façon telle que la visibilité à plus de quelques mètres est impossible durant plusieurs mois. Ce sont le *froid* et les *ténèbres* qui s'installent d'une manière inéluctable. Sans Soleil, la photosynthèse est totalement interrompue, les diverses chaînes alimentaires disparaissent. En outre, si l'impact est océanique (7 chances sur 10, rappelons-le), une énorme quantité de vapeur d'eau est propulsée dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau est la cause d'un important effet de serre, et au froid initial succède, au contraire, un réchauffement très préjudiciable à certaines espèces rescapées de la période de froid. Le réchauffement brutal peut entraîner une combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air, combinaison pouvant déboucher sur une overdose d'oxyde d'azote sous forme d'une pluie d'acide nitrique, susceptible de détruire ou de perturber sérieusement certaines espèces de plantes et d'animaux marins invertébrés.

Reste le problème des radiations (21). L'hiver nucléaire a été disséqué par tous les scientifiques militaires pour savoir les conséquences d'un conflit nucléaire, pour l'homme en particulier et pour son cadre de vie sur un plan plus général. On le sait, les résultats des simulations effectuées dans les années 1980 ne sont pas brillants, ce qui a quand même poussé (bien tardivement) les militaires et leurs commanditaires politiques à être plus prudents qu'auparavant.

La catastrophe écologique (et humaine) de Tchernobyl du 26 avril 1986 a clairement démontré la nocivité de l'irradiation nucléaire, même à dose relativement faible, sur les êtres humains, et peut-être plus encore *sur leur descendance*. Il ne fait pas bon d'être enceinte, même aujourd'hui, pour une

femme habitant depuis 1986 le secteur de Tchernobyl. La radioactivité anormale joue un rôle, inimaginable avant 1945 (Hiroshima et Nagasaki), sur la croissance des enfants, qu'ils soient nés avant ou, à plus forte raison, après la catastrophe. Il est indéniable que leur potentiel génétique a été gravement atteint. Au niveau mondial, une irradiation générale à forte dose pourrait entraîner la quasi-extinction de l'espèce humaine en quelques générations seulement.

Pour ce qui est d'un hiver d'impact, les simulations ne peuvent être qu'imparfaites, car de nombreux paramètres sont approximatifs ou même spéculatifs. La nature des impacteurs de taille kilométrique peut être extrêmement variable, de la comète de glace à la sidérite, comme l'astéroïde 1986 DA qui est, nous l'avons vu, sur une orbite de collision avec Mars, en passant par toutes sortes d'objets mixtes. Si réellement le *petit* impact (objet de 80 mètres au maximum) de la Toungouska a été la cause des mutations et de croissance accélérée signalées par certains chercheurs soviétiques, il y a de quoi s'inquiéter pour l'avenir.

Peut-être faudra-t-il, en cas d'impact majeur, laisser la place à des espèces animales mieux armées que la nôtre pour lutter contre l'irradiation, comme des tortues, des serpents ou des blattes qui ont déjà traversé sans trop de problèmes quelques désastres d'origine cosmique d'envergure et qui ont de grandes chances de nous survivre. L'homme, lui, paraît bien fragile, pour faire "de vieux os" sur cette Terre.

La récurrence des extinctions et les coupables possibles

Cette très intéressante théorie de la *récurrence des extinctions*, qui a eu son heure de gloire dans les années 1980, est aujourd'hui sérieusement discréditée, quasiment abandonnée même par la communauté scientifique dans son ensemble, bien que certains irréductibles veulent encore y croire. Elle a permis l'apparition de deux hypothèses annexes, celle de *Némésis* et celle de *l'oscillation galactique*, dont il est nécessaire de parler en détail, car elles venaient logiquement proposer une double solution crédible à une énigme mise en évidence par les paléontologues.

Au début des années 1980, dès que l'hypothèse des deux Alvarez concernant la fin des dinosaures, il y a 65 MA, prit une telle consistance que la majorité des scientifiques admirèrent sa vraisemblance, de nombreux chercheurs tentèrent de déterminer si les extinctions pouvaient se produire plus ou moins régulièrement *par cycles*.

Il faut dire que, dès le départ, les spécialistes des NEO ont refusé toute possibilité d'extinctions cycliques. Pour eux, qui connaissent déjà plus de 8000 objets qui frôlent la Terre et qui s'attendent à en connaître 20 000 dans vingt ans, l'impactisme ne peut être que *totalelement aléatoire*. Ces impacts se produisent quand un NEA ou une comète sur une orbite de collision se présente *en même temps* que la Terre à ce point de croisement des deux

orbites. Des comètes nouvellement envoyées par des perturbations, d'où qu'elles proviennent, ne sont pas immédiatement sur des orbites de collision et n'ont aucune raison de s'écraser sur la Terre régulièrement. Le matériel susceptible de heurter les planètes existe (il existe depuis toujours *en permanence*) puisque près de 100 000 astéroïdes et noyaux cométaires sont *déjà en place* dans le Système solaire intérieur et sont susceptibles de venir heurter la Terre dès que les lois de la mécanique céleste en auront décidé ainsi. Car c'est elle, la mécanique céleste, et elle seule, qui permet les approches aux planètes et les impacts. Une comète nouvellement arrivée ne choisit pas sa cible ! Elle est d'abord capturée, avant de pouvoir s'approcher fortement des planètes et éventuellement d'en percuter une.

Les paléontologues ne sont pas astronomes et ignorent souvent jusqu'à l'existence même des NEA. Ils ont étudié sur le papier, statistiquement, la *fréquence* et l'*intensité* des diverses extinctions, permettant grâce à une telle approche une très importante avancée scientifique. Ce sont eux qui ont découvert les cinq extinctions majeures (dites de masse), une vingtaine d'autres secondaires et quelques autres mineures. Il était tentant de relier entre eux tous ces pics d'extinction datés avec une bonne précision, calés souvent sur des fins de périodes géologiques, et de comparer les datations avec celles des grands astrolèmes.

Les premiers, David Raup et John Sepkoski Jr. (1948-1999) proposèrent l'*hypothèse d'extinctions cycliques*. Ils présentèrent en 1984 une remarquable étude détaillée (22) de l'histoire des fossiles, depuis le Permien supérieur jusqu'à nos jours. Ils tracèrent une courbe indiquant le pourcentage de familles frappées par les diverses extinctions. Ils mirent ainsi en évidence une étonnante combinaison de crêtes et de dépressions. Sur 39 étages géologiques retenus, 8 crêtes importantes furent privilégiées pour une analyse mathématique et statistique très poussée. Celle-ci paraissait bien indiquer, pour Raup et Sepkoski, une récurrence périodique pour les extinctions.

Ils annoncèrent alors que d'après leurs calculs, il y avait une probabilité de 90 % pour que le taux d'extinction suive un régime cyclique, avec une période de 26 MA entre deux crêtes successives d'extinction. Mais l'examen de leur graphique ne convainquit pas vraiment les scientifiques car la corrélation était très approximative, pour ne pas dire médiocre. Les pics d'extinction sont incontestables, mais la *périodicité* ne peut être réellement établie. Pour les astronomes, elle est même utopique. D'ailleurs, d'autres données retenues, pour d'autres critères, par d'autres équipes de disciplines différentes, conduisirent à des résultats assez différents (chacune éliminant sans trop de complexes les données qui s'éloignaient quelque peu du canevas retenu *a priori*). La période même des extinctions variait de 26 MA à 33 MA, en passant par 28 MA et 32 MA selon les critères retenus, ce qui est un comble, et laissait entrevoir des résultats très douteux sur le long terme.

Quoi qu'il en soit, dès qu'une possibilité d'extinctions cycliques fut mise en évidence, il fallut rechercher un coupable : "*Qu'est-ce qui provoque les*

extinctions de masse, les astéroïdes et les comètes ordinaires ne pouvant, en effet, qu'entraîner des extinctions aléatoires ? "

Fort logiquement, les astronomes (moins les spécialistes des NEO qui n'ont jamais vraiment cru à cette récurrence des extinctions) et d'autres scientifiques concernés pensèrent que les responsables pourraient bien être les comètes du nuage de Oort (à l'époque, on ignorait encore la ceinture de Kuiper mis en évidence à partir de 1992 seulement). Mais encore fallait-il trouver un moyen pour les faire quitter *régulièrement* leur place où elles circulent depuis près de 4000 MA sur des orbites stables.

C'est là qu'une nouvelle fois l'imagination et la créativité des astronomes firent merveille et que deux belles hypothèses, plausibles à première vue, furent proposées : celle de *Némésis*, l'étoile sœur du Soleil et celle de l'oscillation galactique. Nous allons les étudier successivement.

Némésis, l'étoile sœur du Soleil

Ce sont trois astronomes américains, Marc Davis, Piet Hut et Richard Muller, qui ont eu l'idée de *l'hypothèse Némésis* (23/24). Dans cette hypothèse, qui a eu un franc succès d'estime dans les années 1980, Némésis est une étoile encore inconnue, liée au Soleil depuis l'époque de sa formation, et qui perturberait tous les 26 MA le nuage de comètes de Oort, en précipitant un nombre important dans le Système solaire intérieur. Ce nombre accru de comètes entraînerait dans un deuxième temps une augmentation significative du nombre d'impacts et serait en conséquence un important facteur d'extinctions.

Cette hypothèse mérite d'être discutée en détail. Le Soleil et Némésis formeraient un système stellaire binaire, dans lequel le compagnon de faible masse se déplacerait sur une orbite très excentrique autour du centre de gravité commun (que les astronomes appellent le barycentre). On a des exemples de tels systèmes parmi les étoiles voisines du Soleil, à commencer par le système triple formé de *alpha* et *beta* Centauri, les deux étoiles principales, et de la minuscule *Proxima*, éloignée actuellement de 2° 11' des deux autres, une naine rouge de type spectral M 5, dont la masse est de 0,12 masse solaire seulement et qui se trouve à la distance de 4,25 années lumière du Soleil.

Première question : " *Quelle pourrait être l'orbite de Némésis dans un tel système ?* ", sachant surtout que la fameuse "étoile de la mort" n'a encore jamais été observée, ce qui est, on s'en doute, un très mauvais point, rédhibitoire même pour de nombreux astronomes orthodoxes. Si l'on admet une période de 26 MA pour une révolution complète de Némésis, la mécanique céleste fournit quelques réponses sans ambiguïté. Une telle période correspond à un grand axe voisin de 176 000 UA, soit presque trois années lumière. Le demi-grand axe vaut donc 88 000 UA (soit 88 000 fois la distance standard Terre-Soleil, ce qui est considérable). Pour que l'étoile sœur du Soleil perturbe suffisamment les comètes du nuage de Oort, il est

nécessaire de tabler sur une excentricité importante. Celle-ci serait voisine de 0,70, valeur très forte mais tout à fait acceptable. C'est à l'occasion de son passage au périhélie, dans le nuage de Oort, que les perturbations pourraient être possibles. Le périhélie q serait de l'ordre de 26 000 UA et l'aphélie Q de l'ordre de 150 000 UA. Compte tenu des variations de vitesse très importantes de Némésis sur son orbite, la période durant laquelle elle se trouverait à moins de 40 000 UA du Soleil ne durerait que 1 MA, période nécessaire pour perturber significativement les comètes du nuage de Oort.

Deuxième question décisive : " *Quelle est la masse de Némésis ?* ". Il est, en effet, impératif de cerner, au moins approximativement, la masse supérieure et inférieure possible de l'étoile sœur, avec le postulat qu'elle se situerait actuellement près de l'aphélie puisque la dernière "crête d'extinction" remonterait à environ à 13 MA, soit un demi-cycle. Les pro-Némésis tablent sur une distance actuelle de 150 000 UA, soit 2,6 années lumière, distance légèrement moindre de la moitié de celle de l'étoile de Barnard que l'on sait se trouver à 6 années lumière et que l'on connaît depuis plus d'un siècle. D'après les pro-Némésis, la masse maximale de leur étoile (extrêmement optimiste) ne saurait être supérieure à 1,2 fois celle de l'étoile de Barnard, c'est-à-dire en gros à 0,12 masse solaire (ou encore l'équivalent de celle de *Proxima Centauri*). Sa masse inférieure, nécessaire pour perturber valablement le nuage de Oort, serait de seulement 5 fois celle de Jupiter qui, on le sait, est de l'ordre de 1/1000 de celle du Soleil. La masse minimale de Némésis serait donc de l'ordre de 1/200 masse solaire. Les pro-Némésis s'accordent à dire que la masse de leur étoile peut varier d'un facteur 24, entre 0,12 et 0,005 masse solaire.

On sait que la masse minimale pour qu'un corps céleste soit une véritable étoile, capable d'engendrer les réactions nucléaires indispensables, est de 0,05 masse solaire, dix fois supérieure à l'estimation basse de la masse de Némésis. Donc, celle-ci pourrait être une *naine brune* (astre hybride intermédiaire entre les planètes géantes et les mini-étoiles) qui émettrait seulement dans l'infrarouge, ce qui expliquerait qu'on ne l'ait pas encore découverte dans le ciel malgré sa proximité (à l'échelle astronomique).

Troisième question incontournable : " *Où se trouve actuellement Némésis et pourquoi ne l'observe-t-on pas malgré sa proximité ?* ". C'est là que les nombreux sceptiques attendent les pro-Némésis, car en bonne logique, cette étoile, même très peu massive, devrait avoir été observée depuis *très longtemps*. Une chose est bien sûre en tout cas, l'hypothèse Némésis ne peut être acceptée que si l'on découvre enfin cette étoile fantôme. Et plus d'un quart de siècle après les premières recherches, force est de constater que les astronomes sont restés bredouilles !

Même si l'on admet que Némésis est au mieux une naine rouge et au pire une naine brune, on devrait pouvoir la déceler grâce à sa parallaxe. De ce côté-là, le fiasco a été complet, puisque l'étoile fantôme ne figure pas dans le catalogue des 5000 naines rouges les plus brillantes. Les pro-Némésis, pour sauver l'hypothèse, arguent que Némésis étant proche de l'aphélie, sa vitesse

orbitale est très faible, inférieure à 100 mètres par seconde (à comparer aux 29,8 km/s pour la Terre en moyenne). De ce fait, cette faible vitesse associée à une distance de près de 3 années lumière lui donnerait un mouvement proche inférieur à 1/1000 de celui de l'étoile de Barnard (qui est la plus rapide du ciel) et donc quasiment indécélable avec les techniques actuelles.

Quand on fait sérieusement le tour de la question, il faut bien admettre que l'hypothèse Némésis est très peu probable. Les spécialistes des NEO n'y ont jamais cru et les autres astronomes ne veulent pas envisager sérieusement le Système solaire comme étant un système *avec deux étoiles*, même si Némésis ne pourrait être qu'une naine brune. Et une hypothèse pour être crédible doit répondre aux données d'observation. Il est très improbable qu'une étoile comme Némésis ait pu échapper à plusieurs générations d'observateurs bénéficiant d'instruments de plus en plus performants.

L'hypothèse de l'oscillation galactique

Cette deuxième hypothèse est associée à une période de récurrence nettement supérieure à celle de Némésis : 33 MA contre 26 MA, ce qui n'est pas la même chose. D'après ses partisans, une telle période correspondrait également aux pics d'extinction, ce qui montre bien le caractère très approximatif de ces derniers qui, pour bien réels qu'ils soient, ne présentent pas de périodicité marquée, et en tout cas indiscutable. L'idée qui sous-tend cette hypothèse est que le mouvement d'oscillation du Système solaire autour du plan médian de notre Galaxie permettrait à chacun de ces passages de rencontrer des nuages interstellaires, très importants par leur densité, de gaz et de poussières qui perturberaient le nuage de Oort et qui permettraient ainsi la "plongée" de nombreuses comètes dans la partie "planétaire" de notre système.

Ces nuages massifs se situent au voisinage immédiat du plan médian de la Galaxie (un plan bien sûr imaginaire qui divise le disque aplati de notre Voie Lactée en deux parties, dites supérieure et inférieure). Cette oscillation a bien lieu tous les 33 MA, à 1 MA près, et elle permet aux nuages interstellaires traversés d'exercer une force gravitationnelle suffisante pour perturber des astres peu massifs comme les comètes. On pense que certains nuages moléculaires peuvent atteindre des masses de l'ordre de 1 à 10 millions de fois la masse solaire réparties sur des distances considérables pouvant probablement aller jusqu'à 100 années lumière. L'effet maximal des perturbations aurait lieu entre 250 années lumière de part et d'autre du plan médian.

C'est une réalité connue depuis longtemps des astronomes, au lent mouvement du Système solaire autour du centre de la Galaxie (qui se situe à une distance de l'ordre de 30 000 années lumière) se superpose tous les 33 MA environ un inexorable mouvement oscillatoire qui fait passer successivement notre système de la partie supérieure à la partie inférieure du plan médian de la Galaxie et vice versa. Ce mouvement est un vestige remontant à la période même de sa formation à partir d'un nuage présolaire

qui se déplaçait perpendiculairement par rapport au plan médian, tout en faisant une révolution complète autour du centre de gravité galactique en une très longue période estimée à 240-250 MA, c'est-à-dire pratiquement 4 révolutions complètes par milliard d'années. Pas moins de 22 grandes révolutions auraient ainsi été effectuées par le Système solaire depuis sa formation, il y a 4,6 milliards d'années autour de notre Galaxie. Par contre, à raison de 3 oscillations pour 100 MA, on en serait déjà à près de 140 oscillations différentes à travers des nuages interstellaires massifs.

Certains chercheurs ont donc tenté de lier l'intervalle de 33 MA avec la période de récurrence des extinctions de masse. En 1984, Michael Rampino et Richard Stothers (25) ont développé cette idée nouvelle, elle aussi plutôt bien accueillie par une partie de la communauté scientifique, mais catégoriquement repoussée par d'autres chercheurs, notamment des astrophysiciens, qui jugent l'hypothèse une fois chiffrée avec précision tout à fait insuffisante pour justifier le détournement des comètes, cause des impacts ultérieurs, et aussi pour expliquer la périodicité des extinctions.

Pour pallier la masse insuffisante des molécules, même très nombreuses, des nuages interstellaires, quelques astronomes, jamais à court d'idées nouvelles, ont postulé l'existence de la fameuse matière manquante, connue (théoriquement) depuis longtemps, et qui pourrait se trouver en partie dans ces nuages à proximité du plan médian de la Galaxie, plan traversé régulièrement par le Système solaire. On a parlé de naines rouges ou brunes, d'étoiles "épuisées", de grumeaux rocheux de matière plus ou moins hétéroclite, d'anneaux galactiques, et même de trous noirs et de "cordes". Si l'existence de tout ou partie de ces candidats pour expliquer la matière manquante de la Galaxie s'avérait en fin de compte une réalité, la force gravitationnelle qu'elle pourrait exercer sur les parties centrale et externe du Système solaire (et parmi celles-ci le nuage de Oort) serait capable de créer les perturbations nécessaires au détournement des comètes et à leur introduction comme objets "internes" dangereux pour la Terre et les autres planètes.

Cette hypothèse de l'oscillation galactique est astucieuse, tout comme sa rivale alternative Némésis, mais elle n'est pas plus crédible dans son rapport concret avec les extinctions. Pour les spécialistes des NEO, qui sont quand même nettement les mieux placés pour appréhender le problème d'une manière rationnelle, rien ne vaut des objets bien répertoriés comme Apophis, Hermes et Toutatis pour parler des astéroïdes, Hephaistos et Damocles pour parler des comètes éteintes ou même D/Lexell et D/IRAS-Araki-Alcock pour parler des comètes actives, pour rappeler simplement que les astres menaçants existent déjà dans notre banlieue terrestre, et que tôt ou tard, un de nos petits voisins heurtera la Terre, suite aux perturbations gravitationnelles que lui feront subir les planètes voisines. La mécanique céleste est l'ennemie des cycles éternels. La conclusion suivante s'impose : *les extinctions ne peuvent être qu'aléatoires.*

L'histoire de Geminga

L'histoire de *Geminga* (26/27) a commencé en 1972 quand le satellite américain *Sas 2* a repéré dans le ciel gamma une source ponctuelle très caractéristique, émettant à des intervalles réguliers dans la constellation des Gémeaux, non identifiable avec un objet déjà connu des astronomes. Pourtant cette source de rayons gamma est particulièrement intense avec des photons pouvant avoir une énergie de 100 MeV, soit de l'ordre de vingt millions de fois ceux de la lumière visible.

Pendant des années, cette source résista aux recherches destinées à lui trouver une contrepartie en optique, X ou radio. D'où son nom, donné par des astronomes italiens : *Geminga* (contraction de *Gemini gamma*), signifiant en patois milanais : " *Il n'y a rien, elle n'est pas là* ". Le mystère restait entier et plusieurs hypothèses plus ou moins folles circulèrent à son sujet.

En 1979, une source X fut enregistrée à l'emplacement de la source gamma par le satellite américain *Einstein*, mais toujours pas de contrepartie optique qui était obligatoirement très faible si elle existait. En 1984, trois points minuscules furent repérés par l'équipe d'astrophysiciens de Saclay avec une caméra CCD ultrasensible, points lumineux baptisés G, G' et G". S'agissait-il de Geminga ? En 1987, l'existence des trois sources fut confirmée, avec la révélation que G" est probablement un pulsar. Sa périodicité est de 237 millisecondes, soit un peu moins de quatre rotations à la seconde.

Les astrophysiciens en déduisirent la date approximative de sa formation : environ 350 000 ans, et une distance actuelle de seulement 140 années lumière. Aujourd'hui, la vitesse de fuite de Geminga est estimée à environ 300 km par seconde, et les résidus de l'étoile sont donc beaucoup plus lointains qu'au moment de l'explosion initiale. La distance la supernova génitrice pourrait ne pas avoir dépassé 100 années lumière lors du cataclysme, ce qui est considéré pour comme une explosion proche. Pour les spécialistes, pas de doute : Geminga est une étoile massive qui a explosé près de la Terre et ses effets ont dû être très spectaculaires, et peut-être même décisifs.

En 1993, Neil Gehrels et Wan Chen ont émis l'hypothèse que Geminga serait responsable de la bulle de gaz chauds dans laquelle on pense que baignent le Système solaire et les étoiles environnantes. Les astrophysiciens envisagent sérieusement, en effet, que ces bulles de gaz chauds pourraient être créées par l'onde choc initiale des supernovae.

On croit aujourd'hui que Geminga a été visible en plein jour, avec un éclat qui aurait dépassé la Pleine Lune, il y a 350 000 ans, à une époque où *Homo erectus* et *Homo sapiens* cohabitaient encore. Inutile de dire que, pour tous, cette formidable étoile nouvelle visible en plein jour durant plusieurs mois a dû être matière à étonnement et aussi probablement à une sourde crainte, même si on ignore s'ils observaient déjà le ciel avec assiduité.

Les conséquences dues à l'impactisme particulière associé à l'explosion de *Geminga* ont pu être décisives, c'est du moins l'opinion de certains chercheurs. Car danger il y a, on le sait, pour la magnétosphère et l'atmosphère terrestres, avec une telle recrudescence de particules accélérées par l'explosion d'une supernova proche, et notamment certains éléments radioactifs. Certains spéculent donc sur des mutations génétiques, qui pour les plus optimistes auraient conduit à l'intelligence et à l'avènement irrésistible d'*Homo sapiens*. Peu de chercheurs croient réellement à ce scénario. Il paraît plus probable que le bruit de fond de l'évolution est lié à des inversions géomagnétiques.

La retombée des satellites artificiels

Depuis 1957, l'homme a envoyé plusieurs milliers de satellites artificiels autour de la Terre, de toute nature, scientifiques et commerciaux souvent, militaires parfois, nucléaires et très dangereux dans de rares cas. L'espérance de vie de tous ces objets est très variable selon les orbites géocentriques choisies, mais beaucoup ne vivent que quelques années avant de retomber sur la Terre. Ce retour forcé fait de ces objets métalliques de véritables météores et météorites artificiels, qui ont souvent été observés dans de bonnes conditions.

Pour les satellites légers, c'est-à-dire ceux qui ne dépassent pas quelques dizaines de kilos, il n'y a pas de problème : ils brûlent totalement pendant leur traversée des couches denses de l'atmosphère et ne touchent pas le sol. Pour les satellites lourds, ceux pesant plusieurs tonnes, le problème est un peu différent, car ils ne brûlent pas entièrement. Ils peuvent toucher le sol en une masse unique (ce qui est rare) ou disloqués (ce qui est fréquent) et se transformer en météorites artificielles de bonne taille.

Seuls les satellites nucléaires sont vraiment dangereux et je vais en parler plus loin. Mais auparavant, il est intéressant de raconter brièvement l'histoire de *Skylab 1* (28-29), tombé sur Terre le 12 juillet 1979, et qui, à l'époque, a fait la une de la presse du monde entier, car c'était la première fois qu'un satellite aussi massif retombait sur Terre d'une manière *incontrôlée*, ce qui était largement suffisant pour faire peur à tous ceux que la moindre chose anormale alarme inconsidérément.

La chute de Skylab 1 en 1979

La station orbitale *Skylab 1* était le plus massif de tous les satellites artificiels construits à l'époque : 77 tonnes. Il fut lancé le 14 mai 1973 et placé sur une orbite presque circulaire : périégée à 427 km d'altitude et apogée à 439 km. D'après les ingénieurs et techniciens américains qui contrôlaient le vol, il était prévu que *Skylab 1* resterait en orbite au moins jusqu'en 1983, mais il s'est trouvé que *l'activité solaire* a été nettement *plus forte* que prévu. On sait qu'une activité solaire accrue entraîne une plus grande densité de l'atmosphère terrestre supérieure (l'exosphère) et, par

conséquent, un frottement aérodynamique plus élevé pour les satellites artificiels et une durée de vie bien plus faible qu'en période normale.

Skylab 1 a été victime de cette résistance de l'air accrue et sa vie a été singulièrement écourtée, puisque dès le début de 1979, on savait qu'il ne passerait pas l'année. Certains journaux en mal de copie, et toujours à la recherche de sensationnel et d'imprévu, avaient lancé des cris d'alarme un peu ridicules, prévoyant des dégâts très sérieux dans la zone d'impact. Celle-ci devait obligatoirement être comprise entre 50° de latitude nord et 50° de latitude sud, puisque l'inclinaison de l'orbite géocentrique de *Skylab 1* était de 50°. Mais l'endroit de la chute était impossible à prévoir, même approximativement, du fait des phénomènes complexes et imprévisibles dont notre atmosphère supérieure est le siège en permanence. Il faut savoir qu'une précision de *un jour* pour l'instant prévu de la chute de *Skylab 1* correspondait à quinze fois le tour de la Terre. Pour prédire le point de chute à 1000 km près (ce qui manquait déjà singulièrement de précision), il aurait fallu connaître l'instant de la chute à deux minutes près, ce qui était tout à fait illusoire. Moralité à ne jamais oublier : on ne peut jamais prévoir avec précision le lieu de chute d'un satellite artificiel.

Cette chute de *Skylab 1*, guettée par les médias du monde entier, eut lieu de nuit le 12 juillet 1979 à 0 h 37 heure locale (mais le 11 juillet à 16 h 37 en temps universel), dans le sud de l'océan Indien. Elle fut observée dans de bonnes conditions par plusieurs témoins, parmi lesquels quelques astronomes, en Australie occidentale. En fait, *Skylab 1* s'est disloqué dans l'atmosphère et fragmenté en plusieurs morceaux qui laissèrent chacun une source de lumière distincte, bien visible durant une trentaine de secondes seulement.

Les débris se sont éparpillés dans une large zone orientée sud-ouest/nord-est sur le territoire australien. Le plus gros morceau récupéré est un cylindre de deux mètres de long sur un mètre de diamètre, qui était l'un des six réservoirs en acier inoxydable contenant l'oxygène destiné aux astronautes. Ce fragment majeur fut retrouvé près de la ville de Rawlinna, à environ 800 km de Perth. Mais il faut signaler que *Skylab 1*, comme tous les autres satellites de bonne taille retombés sur Terre, n'a pas causé le moindre dégât sérieux, contrairement aux prévisions alarmistes de certains charlatans.

Il faut donc minimiser le risque occasionné pour la Terre et pour les hommes par ces retombées de satellites artificiels *ordinaires*, bien qu'il soit quasiment impossible de contrôler efficacement leur retour à la surface terrestre. Le danger est pratiquement nul.

Les satellites nucléaires, des bombes au-dessus de nos têtes

Le danger est quasiment nul, *sauf* s'il s'agit de la retombée des *satellites nucléaires* lancés dans les années 1970 et 1980 dans le cadre de la trop fameuse *guerre des étoiles* instituée par les stratèges militaires et politiques américains, soviétiques et chinois durant la guerre froide. Bien que ces

satellites militaires ultra-dangereux soient secrets (leur existence n'a jamais été confirmée officiellement et elle est même niée par les États concernés), on sait que certains circulent bel et bien au-dessus de nos têtes, véritables épées de Damoclès. Ils ont été lancés d'une façon totalement inconsidérée par des apprentis sorciers qui ont laissé un triste héritage aux générations à venir qui devront trouver une solution appropriée pour s'en débarrasser définitivement, peut-être en les accélérant sur des orbites hyperboliques. Ainsi la folie des hommes serait "satellisée" autour de la Galaxie pour un voyage sans fin.

Que sont concrètement ces satellites nucléaires ? On ne le sait pas exactement. On a parlé d'authentiques missiles, parqués sur des orbites d'attente et considérés comme une force de frappe "spatiale". Quelle est leur puissance de destruction en terme de mégatonnes ? Peut-être certains pourraient-ils être utilisés (*recyclés* d'après la terminologie des militaires) pour détruire un astéroïde ou une comète réellement menaçant à court terme. On a fantasmé aussi sur des bombes *chimiques* ou *bactériologiques* prévues en "représailles" en cas d'attaque nucléaire de l'ennemi et qui pourraient anéantir toute vie sur un périmètre dont on ignore l'importance. La prolifération des armes nucléaires pourrait, à terme, déboucher sérieusement sur un tel danger, encore semble-t-il (heureusement !) à l'état des préliminaires. Mais avec l'homme, et aujourd'hui l'ère nucléaire, " *le ver est dans le fruit* ", comme l'ont bien dit plusieurs savants responsables et inquiets pour l'avenir.

Il semble bien, aujourd'hui, que l'homme soit un danger plus grand que la nature elle-même pour le maintien de la vie terrestre à moyen terme. Cruel paradoxe : le catastrophisme terrestre et cosmique *naturel*, qui a permis à l'évolution de passer de la bactérie à l'homme en quatre milliards d'années, est maintenant quasiment supplanté par le catastrophisme technologique et écologique *d'origine humaine*, qui risque d'hypothéquer la vie en quelques siècles seulement, et peut-être même moins. Incroyable raccourci, mais il faut le rappeler quand même : uniquement une histoire locale. L'homme n'est rien d'autre qu'un phénomène local. Qu'il se détruise ou non, l'Univers n'en sera pas changé d'un iota.

L'activité solaire, la vie terrestre et l'histoire

J'ai dit quelques mots sur le sujet au chapitre 8, dans la section " *Le Soleil et la Terre* " concernant les rapports entre l'activité solaire et la vie terrestre. Je reviens dessus pour mieux en apprécier les *conséquences*.

L'importance exceptionnelle de l'activité solaire durant les années 1979 et 1980 a été mise à profit par certains chercheurs du milieu médical pour faire des statistiques concernant la relation entre l'activité solaire et la recrudescence de certains troubles physiques ou du comportement. Dans un article sur le sujet, publié dans *Le Parisien Libéré* du 18 février 1980, on pouvait lire le passage suivant :

" Les végétaux ne sont pas les seuls qui soient sensibles aux variations de l'activité solaire. L'homme l'est également ainsi que le montrent les travaux du docteur Faure en France et de son collègue allemand le docteur Dull qui, dès 1935, estimaient que la recrudescence des crises cardiaques est liée à l'intensification de cette activité. Hypothèse confirmée en 1959 par le docteur Viard dans une communication à l'académie des Sciences et en 1978 par les observations du docteur Malin, un médecin anglais.

Ce dernier, en dressant des statistiques dans un grand hôpital indien, a, en effet, montré que le nombre d'admissions pour infarctus dans cet hôpital croît de 30 % lorsque l'indice géomagnétique, directement lié à l'activité solaire, augmente lui de 14 %. Enfin, d'autres chercheurs travaillant avec les élèves de plusieurs lycées ont montré que le niveau des sanctions s'accroît en période d'orage magnétique dus au Soleil. Ils en déduisent que ces orages accroissent la nervosité des enfants et, également, celle des adultes. " (30)

Ainsi pour tous ceux qui ont étudié le problème de près, la corrélation entre activité solaire et troubles pathologiques divers semble indéniable, et les personnes âgées, les enfants et tous ceux qui présentent une fragilité particulière sont les premiers visés, les premières *victimes* pourrait-on dire. Des victimes qui peuvent succomber, si l'on en croit la recrudescence significative des infarctus et autres malaises. L'auteur de l'article concluait :

" En modifiant l'environnement humain, les variations de l'activité solaire modifient le comportement des hommes, ce qui entraîne un certain nombre de bouleversements politiques, sociaux et économiques. Le Soleil influe par conséquent sur le déroulement de notre histoire. Certes, ce ne sont pas ses périodes d'activité qui déclenchent les révolutions et les guerres, mais en exacerbant la nervosité humaine elles y contribuent certainement. " (31)

Qu'en est-il de ces "bouleversements politiques, sociaux et économiques" ? Depuis que les astronomes font des statistiques régulières sur le nombre de taches solaires, il a été facile de dater les hauts et les bas de *l'activité solaire*. Et comme tous les cycles obtenus se prêtent bien aux statistiques, des scientifiques curieux ont tenté de faire des corrélations avec des événements historiques.

La première question qui se pose est évidemment celle-ci : " *Y a-t-il vraiment corrélation entre l'activité solaire et les bouleversements historiques ?* ". D'accord, les gens sont plus nerveux, s'emportent plus facilement, sont moins réceptifs aux arguments des partenaires ou adversaires, mais après ? Les schémas classiques sur la variation du nombre de taches comptées annuellement à la surface du Soleil pour les cycles recensés depuis 1750

montrent clairement une période moyenne *moyen* de 11 ans avec quelques points hauts spectaculaires. Le problème c'est qu'il y a tous les ans des bouleversements dans le monde (le monde, ce n'est pas uniquement l'Europe et la France), *même en période de Soleil calme*. Evidemment, il est tentant de relier quelques grandes dates de l'histoire avec des pics d'activité : révolutions de 1789, 1830 et 1848, guerres de 1870 et 1914, événements de mai 1968, tous événements purement français d'ailleurs, mais quelle corrélation *réelle* doit-on en tirer ? Les révolutions, guerres, mouvements sociaux, mécontentements divers, dictatures sont de tout temps, de toutes les époques, activité solaire dans le creux ou dans le haut du graphique.

Sur ce sujet particulier, la majorité des chercheurs ne souscrivent pas à cette simple hypothèse permettant de croire à une incontestable relation de cause à effet. En règle générale, il faut se méfier des statistiques (32). Pour eux, cette relation n'est que coïncidence, tout comme est coïncidence une élucubration astrologique qui annonce pour le jour à venir la mort possible d'un artiste, alors qu'il en existe des centaines dont le nom est connu et qui, souvent âgés ou malades, sont susceptibles de "donner raison" à l'astrologue qui se prend pour un voyant inspiré.

L'influence de l'activité solaire sur la biosphère, le monde végétal et animal, les humains ne fait pas vraiment de doute. Il y a des preuves. Une activité maximale fragilise les plus faibles, comme le font également les hivers glaciaux. Dans le futur proche, elle risque aussi (et surtout) d'entraîner parfois une incertitude *technologique* en perturbant même, dans certains cas extrêmes, la vie normale des gens (panne générale de courant comme cela s'est déjà produit en 1989) et donc susceptible de dégénérer en paniques incontrôlables.

Pour ce qui est de son rapport avec l'Histoire, l'activité terrestre semble la dépasser, en ce sens que l'activité solaire, qu'elle soit minimale ou maximale, n'a pas l'influence décisive qu'on lui octroie parfois. Sur chaque continent et dans chaque région, les contingences humaines, politiques, militaires, sociales, économiques, religieuses priment sur le Soleil. Sur Terre, c'est l'homme fait la loi et les catastrophismes *technologique* et *écologique* ont (provisoirement) pris le pas sur les deux autres catastrophismes naturels (terrestre et cosmique) qui font surtout sentir leur influence sur le moyen et le long terme.

Notes

1. P. Kohler, *Les derniers jours du monde* (France-Empire, 1980).
2. F. Ramade, *Les catastrophes écologiques* (McGraw-Hill, 1987).
3. *La Terre bombardée*, pp. 184-185.
4. W. Vernadsky, *La biosphère* (Diderot éditeur, 1997 ; préface de J.-P. Deléage). Ce classique de l'écologie est paru pour la première fois en russe en

1926 et en français en 1929. Comme le dit fort justement Jean-Paul Deléage dans sa préface (p. 23) : " *Le concept de biosphère introduit par Vernadsky présente en définitive l'immense mérite, trop longtemps ignoré, de prendre en considération les interactions réciproques qui unissent les êtres vivants, leur milieu terrestre et les flux d'énergie venus du cosmos et pour l'essentiel de notre étoile solaire* ".

5. G. Beltrando et L. Chémery, *Dictionnaire du climat* (Larousse, 1995). Un excellent dictionnaire pour connaître l'essentiel des problèmes liés au climat et à l'atmosphère terrestres.

6. J.E. Lovelock, *La Terre est un être vivant. L'hypothèse Gaïa* (Flammarion, 1993). Titre original : *Gaia, a new look at life on Earth* (1979). On peut lire aussi du même auteur : *Les âges de Gaïa* (Robert Laffont, 1990). Titre original : *The ages of Gaïa* (1988).

7. G. Dupont, *La Terre est-elle un astre vivant ?*, Science et Vie, pp. 25-33, 1988.

8. P. Lantos, *Le Soleil en face* (Masson, 1997). Ce livre est sous-titré *Le Soleil et les relations Soleil-Terre*.

9. Il faut bien comprendre que l'évolution *gradualiste* (le bruit de fond de l'évolution) et l'évolution *catastrophiste* ne sont pas antinomiques, comme on le voit souvent écrit, mais qu'au contraire elles sont *complémentaires*, au bénéfice de la complexité et de la diversité des espèces.

10. A. Mazaud et C. Laj, *Chaos dans la dynamo terrestre*, dans *Le chaos*, Dossier Pour la Science H6, pp. 91-92, janvier 1995.

11. Pour une majorité de chercheurs, les inversions géomagnétiques sont liées au noyau terrestre, mais il semble probable que d'autres soient dues à des événements extérieurs à la Terre elle-même. Le chaos intervient dans les deux cas sur des périodes de plusieurs millions d'années, jamais les mêmes. Le chaos, par définition, est imprévisible.

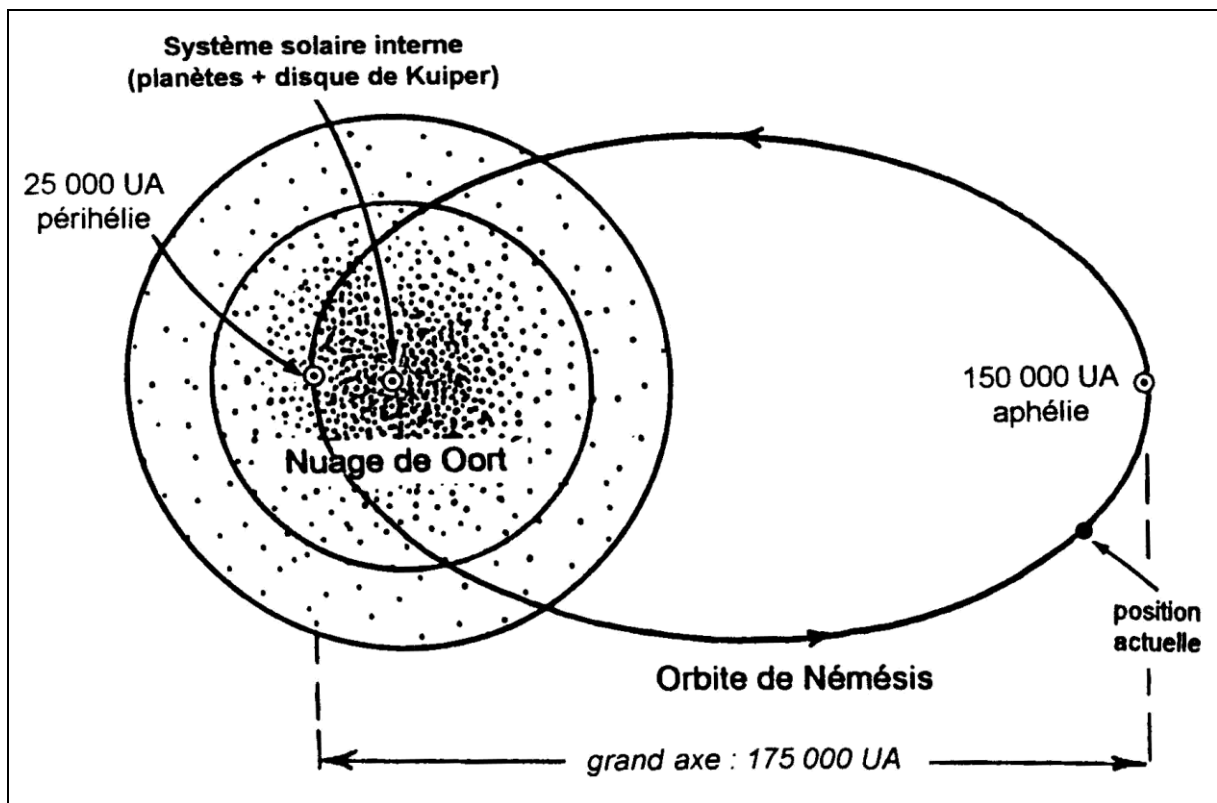
12. S. Cieslik, *L'ozone stratosphérique*, La Recherche, 68, pp. 510-519, 1976.

13. Il appartiendra aux chercheurs du XXI^e siècle de prouver la corrélation entre rayons cosmiques et mutations génétiques et chromosomiques. Actuellement, on ne possède pas de preuves formelles, seulement de très forts soupçons. Plusieurs chercheurs pensent maintenant que la Terre serait particulièrement menacée (et avec elle les êtres vivants qu'elle abrite) quand elle traverse, avec tout le Système solaire, les bras de la Galaxie au cours de son périple de 250 MA autour de celle-ci. Ils proposent même parfois une corrélation avec les extinctions de masse. Lire à ce sujet : J.-P. Defait, *Extinctions : les nouveaux scénarios cosmiques*, Ciel et Espace, 338, pp. 36-43, juillet 1998.

14. Cité par Peter Kolosimo dans *La planète inconnue* (Albin Michel, 1974), p. 254. Jakob Eugster a préfacé l'édition originale italienne de ce livre : *Il pianeta sconosciuto* (1969).
15. C. Flammarion, *Rencontre probable de la comète de Halley avec la Terre*, L'Astronomie, 24, pp. 27-31, 1910. Flammarion raconte dans l'un de ses articles de l'époque qu'en 1910, aux Etats-Unis, on vendait des pilules spéciales censées protéger des effets nocifs à venir causés par l'interaction de la queue de la comète de Halley avec l'atmosphère terrestre. On se demande comment les charlatans qui commercialisaient ces pilules ont pu trouver des clients !
16. E. Liais, *L'espace céleste et la nature tropicale* (1865). Cette citation a été utilisée par Anny-Chantal Levasseur-Regourd et Philippe de La Cotardière dans leur livre *Les astéroïdes et les comètes* (p. 44).
17. R. Baer, *Passage de la Terre dans la queue de la comète de 1861* (extrait d'une lettre à Camille Flammarion), L'Astronomie, 24, pp. 404-409 (figures 179 et 180), 1910.
18. F. Hoyle and N.C. Wickramasinghe, *Does epidemic disease come from space ?*, New Scientist, 76, 1078, pp. 402-404, 1977.
19. A. Guillemin, *Les comètes*, 1875. Un vieux classique, plus que centenaire, encore utilisé de nos jours par les auteurs modernes.
20. P.R. Ehrlich, C. Sagan, D. Kennedy et W. Orr Roberts, *Le froid et les ténèbres* (Belfond, 1985). Titre original : *The cold and the dark* (1984). C'est le fameux livre qui traite des conséquences climatiques et biologiques qu'entraînerait un conflit nucléaire.
21. G. Charpak et R.L. Garwin, *Feux follets et champignons nucléaires* (Odile Jacob, 1997). Lecture indispensable pour mieux connaître le nucléaire, qu'il soit civil ou militaire. Le chapitre 5 intitulé " *Les radiations et le vivant* " (pp. 142-186) est particulièrement intéressant.
22. D.M. Raup and J.J. Sepkoski Jr, *Periodicity of extinctions in the geologic past*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 81, pp. 801-805, february 1984.
23. D. Goldsmith, *Némésis, l'étoile du destin* (Robert Laffont, 1986). Titre original : *Nemesis, the death-star and other theories of mass extinction* (1985).
24. M. Davis, P. Hut and R.A. Muller, *Extinctions of species by periodic showers*, Nature, 308, pp. 715-717, 19 april 1984.
25. M. Rampino and R. Stothers, *Geological rhythms and cometary impacts*, Science, 226, p. 1427, 21 december 1984.

26. J.-F. Robredo, *La supernova qui a soufflé la Terre*, Science et Vie, 908, pp. 68-71, mai 1993.
27. J. Paul, *L'homme qui courait après son étoile* (Odile Jacob, 1998). Jacques Paul consacre tout un chapitre de son livre (le chapitre V, pp. 137-171) à l'affaire Geminga, affaire dont il fut un des acteurs essentiels.
28. J. Meeus, *Skylab 1*, L'Astronomie, 93, pp. 502-504, 1979.
29. J. Vercheval, *La retombée de Skylab*, Ciel et Terre, 95, pp. 225-230, 1979.
30. F. Lancel, *Lorsque le Soleil brûle... la Terre s'enflamme*, Le Parisien Libéré, p. 26, 18 février 1980.
31. F. Lancel, citation extraite de l'article ci-dessus.
32. J. Meeus, *Mathematical astronomy morsels* (Willmann-Bell, 1997). Lire le chapitre 53 : *Statistics : danger !* (pp. 315-319) et le chapitre 54 : *Sunspots and the weather* (pp. 319-328), pour bien comprendre que les statistiques doivent être interprétées avec circonspection et esprit critique.

Figure 8. **L'hypothèse Némésis**



CHAPITRE 17

LES FAUSSES PISTES

Des érudits et des charlatans réécrivent l'histoire du monde

Avant d'étudier en détail les *cataclysmes terrestres* (chapitre 18) et les *cataclysmes cosmiques* (chapitre 19) récents, il est nécessaire de "faire le ménage", car d'innombrables hypothèses et élucubrations interfèrent avec des informations certaines, ou seulement possibles, mais crédibles. Ce chapitre a pour but d'éliminer quelques hypothèses qui ont eu, et ont encore parfois, un succès d'estime, mais qui se sont avérées fausses. C'est ce qui arrive pour certaines idées qui apparaissaient d'abord riches de promesses, mais qui ne résistent pas à l'analyse et aux données d'observation, comme par exemple *l'hypothèse Némésis*, qui semblait à certains probable dans les années 1980, mais qui s'est dégonflée progressivement et est aujourd'hui abandonnée, sauf par quelques derniers partisans obstinés.

D'autres hypothèses, par contre, furent jugées fausses par les scientifiques dès leur parution, comme *la comète Vénus* de Velikovsky, par exemple. Cette hypothèse eut un succès populaire inversement proportionnel à ses bases scientifiques inexistantes. Certaines idées publiées, enfin, reposent sur de véritables fantasmes, comme les cataclysmes millénaristes ou les alignements et les groupements de planètes, dont les effets sont inexistants. Pourtant, certaines de ces élucubrations ont la vie dure, entretenues par des rêveurs, des astrologues ou des charlatans.

Parallèlement à ces hypothèses farfelues, des érudits, des scientifiques, des ingénieurs ou des historiens ont tout au long du XX^e siècle, proposé des hypothèses pour pallier l'insuffisance des théories "officielles", qui bien souvent péchaient par manque d'imagination et n'avaient pas une crédibilité suffisante. Certaines de ces solutions proposées étaient révolutionnaires, mais presque toutes présentaient des insuffisances et ne pouvaient expliquer les observations. Or, toute hypothèse doit s'appuyer sur des observations incontestables pour être plausible, à défaut d'être certaine et définitive.

La comète Vénus de Velikovsky

Parmi tous ces érudits qui ont voulu réécrire l'histoire du monde, l'un d'entre eux est particulièrement célèbre. C'est Immanuel Velikovsky (1895-1979) qui a brossé, dans ce qu'il a appelé un "essai de cosmologie historique", une fresque qui a obtenu un succès commercial mondial, mais non sans contrepartie. Son livre fameux, *Worlds in collision*, traduit en français sous le titre *Mondes en collisions* (1), paru en 1950, a eu un double effet. Il a plu au grand public par son côté mystérieux, son vernis scientifique et aussi par le parfum d'érudition qu'il dégage en première

lecture. Mais, revers de la médaille, il a contribué à faire passer Velikovsky pour un charlatan qui s'est mis à dos la quasi-totalité de la communauté scientifique de l'époque.

Car il faut bien le redire, même si cet auteur passe encore parfois pour un martyr de la science (2/3) (de moins en moins souvent !), son livre est inacceptable sur un plan strictement scientifique, bien que le côté historique soit remarquablement intéressant. La méconnaissance de Velikovsky sur la partie astronomique du sujet est flagrante et l'a conduit à des excès que les astronomes américains des années 1950, notamment Harlow Shapley (1885-1972) qui fut son adversaire n° 1, ne lui ont jamais pardonné. Vouloir faire de Vénus une *ancienne comète* éjectée par Jupiter, il y a seulement quelques milliers d'années, a fait crier à l'imposture tous les astronomes qui ont lu ou entendu parler de son livre. Car le Système solaire est un système stable qui ne se prête en aucune manière à des improvisations de ce genre. Les sondes spatiales qui ont étudié Vénus de près n'ont eu aucune peine à confirmer que cette planète n'a rien d'une comète capturée il y a 3500 ans, même si elle a ses particularités propres, comme chacune des autres planètes.

La découverte récente du volcanisme permanent et violent qui existe sur Io, le satellite galiléen n° 1 de Jupiter ne semble pas être en mesure de pouvoir relancer le débat sur l'injection possible de matière volcanique (sous forme de *comètes*) dans le Système solaire, hypothèse qui avait été envisagée par plusieurs scientifiques, notamment soviétiques, dans les années 1950 (4).

Les quatre lunes de Hörbiger

Cette théorie (5), qui remonte au début du XX^e siècle, a eu un extraordinaire succès en Allemagne et en Autriche jusqu'au début des années 1930, grâce au fait qu'elle était popularisée par le cosmologiste autrichien Hans Hörbiger (1860-1931), pseudo-scientifique et prophète nazi de triste mémoire, et qu'elle faisait quasiment partie de la propagande scientifique des Allemands entre les deux guerres. Hörbiger était l'auteur d'une cosmologie sur la formation de l'Univers, basée sur l'antagonisme entre la Glace et le Feu, connue sous le nom de *Glazialkosmogonie*.

Il postulait que quatre satellites de la Terre s'étaient succédé, les trois premiers s'écrasant sur notre planète à la fin des trois grandes ères géologiques, et y ayant provoqué d'innombrables dégâts, comme l'avaient signalé les géologues des générations précédentes. Une première lune se serait écrasée à la fin du Primaire, permettant l'apparition des insectes géants et de végétaux tout aussi démesurés. Une seconde lune l'aurait ensuite remplacée (à la suite d'une capture) avant de heurter la Terre à son tour, provoquant la fin du Secondaire, cataclysme lié avec l'apparition des premiers hommes : des Géants et celle des grands animaux aquatiques. C'est la troisième lune qui aurait provoqué l'Apocalypse à la suite d'un nouvel impact à la fin du Tertiaire, il y a environ 150 000 ans, provoquant la disparition des Géants et l'apparition d'une nouvelle humanité dégénérée (!). Pendant 37 000 ans, ensuite, la Terre n'aurait pas eu de satellite, ce qui

aurait entraîné la décadence de la vie terrestre. La Lune actuelle daterait de seulement 13 000 ans et serait donc très récente, il s'agirait d'une ancienne planète circulant auparavant entre la Terre et Mars et qui serait aussi plus grosse que les lunes précédentes.

Nous sommes là en pleine élucubration. Que des scientifiques aient pu soutenir une telle théorie paraît invraisemblable. Hörbiger était bien en peine pour justifier le renouvellement de ces lunes successives, privilégiant la théorie de la capture, à la mode à son époque. Mais une quadruple capture rendait déjà de son vivant cette théorie totalement inacceptable. On sait aujourd'hui qu'il est très peu probable qu'il ait pu exister une seconde lune durablement. Si quelques astéroïdes ou comètes ont été satellisés autour de notre planète durant les quatre derniers milliards d'années, ils furent à coup sûr éliminés très rapidement, et il ne pouvait s'agir en tout état de cause que de petits objets, de taille kilométrique au maximum.

L'explosion de Sirius B et la cosmogonie des Dogons

Il s'agit d'une autre hypothèse fantastique (6), basée sur deux bizarreries différentes concernant Sirius, non liées entre elles, qui a encore des partisans dans la mouvance parascientifique, mais qui ne repose pas sur une argumentation convaincante et surtout scientifique.

L'histoire de *Sirius B*, version Dogons, a été connue à partir de 1931, grâce surtout aux remarquables travaux de l'ethnologue français Marcel Griaule (1898-1956) (7), et elle est depuis source de polémique bien qu'elle n'ait jamais été prise très au sérieux par les scientifiques. Mais le mystère demeure. Un livre, *The Sirius mystery* (8), lui a été consacré en 1976 par le linguiste astronome américain Robert Temple, dans lequel l'auteur reprenait toutes les connaissances sur le sujet et les diverses hypothèses possibles.

La mythologie des Dogons plonge ses racines dans une antiquité impossible à déterminer avec précision, mais au moins millénaire. Étonnamment, les membres de cette tribu soudanaise savent qu'autour de Sirius circule une autre étoile qui est, elle, invisible, et aussi que sa période de révolution est de 50 ans. Tous les 50 ans d'ailleurs, les Dogons font une fête spéciale pour commémorer un nouveau cycle orbital qui démarre. Cette fameuse étoile invisible c'est *Sirius B*, une étoile de magnitude 8,7 dont l'existence fut annoncée en 1844 par Friedrich Bessel (1784-1846), du fait des petites perturbations qu'elle fait subir à l'étoile principale, mais observée seulement en 1862 par l'opticien américain Alvan Clarke (1804-1887) à l'endroit exact calculé par Bessel. On sait qu'en gros l'éclat de Sirius A est près de 10 000 fois supérieur (10 magnitudes) à celui de Sirius B, ce qui rend l'observation de cette dernière extrêmement délicate puisqu'elle est totalement noyée dans l'éclat aveuglant de l'étoile principale.

Plus étonnant encore, les Dogons croient savoir qu'une troisième étoile tournerait dans le système et que celle-ci aurait un satellite. Cette troisième

étoile, baptisée *Sirius C*, soupçonnée dès 1894 pour expliquer des variations résiduelles de Sirius A, a été confirmée en 1995. Il s'agirait d'une petite naine rouge gravitant à très faible distance de Sirius A et qui est repérable uniquement par les perturbations, faibles mais bien réelles, qu'elle crée dans le système de Sirius.

Sirius pose un autre problème agaçant et non résolu : sa couleur aurait changé depuis l'Antiquité, époque à laquelle elle était notée comme étant une étoile *rouge*. On sait qu'aujourd'hui Sirius est une superbe étoile *blanche* (de type spectral A0).

Dans son *Dictionnaire de l'astronomie*, Philippe de La Cotardière explique :

" D'après certaines observations anciennes, Sirius serait apparue jadis rougeâtre (alors qu'elle est blanche de nos jours). Cette modification de teinte, si elle est réelle, pourrait être l'indice d'une évolution particulièrement rapide de Sirius B : celle-ci aurait été jadis une géante rouge dont l'éclat surpassait celui de Sirius A, mais qui, entre la fin du VI^e siècle et le début de XVI^e siècle, se serait effondrée pour devenir la naine blanche connue aujourd'hui. " (9)

Quel rapport entre les connaissances des Dogons et le fait que Sirius aurait changé de couleur durant la période historique ? Apparemment aucun. Concilier les deux relève de la fiction pure et simple. En fait, toute corrélation entre deux faits bizarres concernant la même planète paraît assez invraisemblable. Les connaissances des Dogons et l'origine de leur mythologie concernant le système de cette étoile restent inexplicables, et on comprend qu'elles aient fort surpris un ethnologue comme Griaule qui croyait enquêter sur une tribu comme les autres. Le doute a poussé les partisans des êtres supérieurs du cosmos à postuler la venue de visiteurs venus du système de Sirius qui auraient enseigné aux ancêtres des Dogons quelques données concernant leur étoile. D'autres auteurs, partisans de la panspermie dirigée, pensent que cette visite aurait eu pour but de "perfectionner" l'homme par des croisements "interstellaires".

Le changement de couleur de Sirius ne s'explique pas non plus très bien. Il paraît impossible qu'une nova si proche n'ait pas laissé de trace, encore que les manifestations de celle-ci aient pu être partiellement masquées par l'éclat global du système. Mais les bouffées de matière et de radiations crachées par Sirius B auraient dû entraîner une crise terrestre, avec une augmentation très sensible de l'impactisme particulière, et notamment une recrudescence marquée de phénomènes atmosphériques. Rien de tel n'a, semble-t-il, été observé. L'effondrement de Sirius B en naine blanche, en fait, doit remonter à plusieurs centaines de *millions* d'années, peut-être même davantage. Un cataclysme stellaire *récent* dans la proche banlieue solaire n'est pas crédible d'où la place de l'histoire de Sirius dans le chapitre " *Fausses pistes* ".

Vela X, l'étoile de Sumer et la légende d'Oannès

Dans le même genre d'idées fantastiques, il faut parler de l'hypothèse de l'érudit américain George Michanowsky (1920-1993), popularisée dans un livre paru en 1977 : *The once and future star* (10) (traduit en français sous le titre : *Le retour de l'étoile de Sumer*). Son idée de base repose sur le lien possible entre la grande supernova de la constellation des Voiles (perpétuée par son résidu cosmique, le pulsar Vela X, dont j'ai parlé au chapitre 8) et les origines de la civilisation. Michanowsky était un remarquable spécialiste des langues anciennes et son approche, différente de celle des astronomes, est très intéressante et aurait pu déboucher sur une découverte majeure, à la fois sur le plan historique et sur le plan mythologique.

D'abord, il faut préciser deux choses pour bien situer cet événement en tous points exceptionnel, unique même. La supernova fut visible quasiment comme un deuxième soleil, situé très près de 45° de latitude sud. Le pulsar qui en résulte est catalogué sous le nom de PSR 0833-45 (-45 signifiant 45° de latitude sud). Durant plusieurs mois, tous les habitants de l'hémisphère sud et ceux de l'hémisphère nord vivant en dessous de 35° suivirent l'évolution de cette gigantesque source de lumière totalement imprévue. Il s'agissait d'un des phénomènes cosmiques les plus grandioses dont l'homme a été le témoin depuis 15 000 ans, et il a eu obligatoirement un impact psychologique énorme et débouché sur la création de mythes et de légendes dont certains, souvent déformés, sont arrivés jusqu'à nous.

Deuxième chose, les Sumériens et avant eux les autres peuplades protohistoriques de la région, qui observaient chaque nuit le ciel vers le sud, connaissaient obligatoirement les étoiles de la Croix du Sud et les autres étoiles principales visibles sous leur latitude. Il ne peut donc y avoir confusion sur l'identification des étoiles brillantes.

Quand il eut connaissance par des articles de la presse scientifique de la probable association génétique entre la nébuleuse Gum, la supernova des Voiles et le pulsar Vela X, Michanowsky entreprit des recherches pour savoir si la supernova avait été observée et notée par les Anciens sous une forme quelconque. D'après lui, un phénomène de cette importance n'avait pu passer inaperçu. Il songea à se référer aux textes originaux qui traitent du ciel de l'ancienne Mésopotamie. Il connaissait l'existence d'une tablette sumérienne appartenant à la riche collection du *British Museum* connue sous le nom de tablette BM-86378. Cette tablette exceptionnelle avait déjà été exploitée par des érudits au début du XX^e siècle, notamment par le grand spécialiste allemand de l'astronomie cunéiforme Franz-Xavier Kugler (1862-1929). Son contenu est astronomique et concerne surtout un catalogue d'étoiles mésopotamien.

Michanowsky savait par la presse que l'âge le plus probable pour l'explosion était -9000, mais il savait aussi que certaines variations ou "dérapages" dans la fréquence des pulses auraient pu intervenir et autoriseraient ainsi une date plus récente, possible jusqu'à -4000. Tant et si bien que dans les

années 1970, certains chercheurs pensaient même que la date historique permettrait de déterminer la date astronomique de l'explosion.

D'après Michanowsky, l'astrophysicien britannique Antony Hewish, expert en radioastronomie et codécouvreur des pulsars en 1967, acceptait vers 1975 l'idée d'une possibilité d'un ralentissement de la fréquence des signaux d'un pulsar dans quelques cas particuliers.

" Le professeur Hewish explique les "dérapages" dans le ralentissement des signaux d'un pulsar de la façon suivante : on suppose que le pulsar a une forme ellipsoïdale lorsque sa rotation est extrêmement rapide et qu'il devient plus sphéroïde au fur et à mesure que sa vitesse diminue. Il est constitué d'éléments solides et peut donc changer de forme assez brusquement par un processus de fractionnement. C'est ce qu'on appelle la théorie du tremblement d'étoiles. " (11)

La distance de Vela X a été évaluée à environ 400 parsecs, soit 1300 années lumière, ce qui reste assez proche pour une supernova, mais l'intensité des rayons X, gamma et cosmiques est probablement insuffisante pour avoir des conséquences vraiment sérieuses sur la vie, puisque la magnétosphère et, en deuxième rideau, l'atmosphère terrestre en absorbent et neutralisent la plus grande part. Par contre, l'effet de surprise et de terreur passé, les conséquences *psychologiques* ont dû être énormes.

Michanowsky reprit l'étude très détaillée de la tablette BM-86378 et comme ses prédécesseurs du début du XX^e siècle, il comprit qu'elle reflète certains aspects de la connaissance astronomique remontant vers -3000, et même beaucoup plus parfois. Deux lignes de cette tablette font référence à une étoile géante située à l'endroit même où s'est produite l'explosion de la supernova. Kugler, le premier historien astronome à avoir disséqué le contenu de la tablette avait fait remarquer que le texte s'appliquait à une région du ciel austral que la mythologie assimilait comme étant l'équivalent céleste de la cité d'Eridu, demeure sacrée du dieu sumérien E-A.

Michanowsky a défini la région comme étant le triangle céleste formé par les étoiles dzéta de la Poupe ($m = 2,3$) et gamma ($m = 1,8$) et lambda ($m = 2,2$) des Voiles. C'est précisément à l'intérieur de ce triangle d'étoiles relativement brillantes que le pulsar PSR 0833-45 a été localisé, ce qui paraît, à première vue, plus qu'une simple coïncidence. Cette région céleste était considérée comme très importante dans la tradition céleste mésopotamienne, alors qu'aujourd'hui rien n'y attire l'attention particulière d'un observateur, puisque les étoiles principales sont de magnitude 2.

Dans son livre, Michanowsky explique l'importance de ce triangle céleste :

" L'ancienne étoile, maintenant écoutée, lance à travers l'espace des signaux que rythment les battements puissants de son cœur. Comme le dit exactement l'ancienne tablette, la demeure

céleste de Nin-Mah, la Très Haute Dame, est située juste au nord de ce qui fut un jour l'étoile géante d'E-A, dans la constellation des Voiles, la céleste et sainte Eridu. " (12)

La fameuse légende d'Oannès, être mythique mi-homme, mi-poisson a été transmise par le prêtre chaldéen Bérose (dont j'ai parlé au chapitre 1), qui lui-même la tenait d'une multitude de devanciers. Oannès était considéré comme le dieu qui surgissant du golfe Persique aurait enseigné aux premiers habitants de Mésopotamie les arts de la civilisation (écriture, mathématiques, science des étoiles). Les érudits relient aujourd'hui E-A et Oannès, considérés comme le *poisson divin* (!).

Comme conclusion de sa minutieuse analyse des textes anciens et de sa connaissance de l'astronomie, Michanowsky propose la solution suivante :

" J'en suis venu à la conclusion que la légende d'Oannès devait ses origines à la grande étoile des Voiles et que l'apparition de ce prodige céleste était finalement resté dans les mémoires comme la visite d'une entité surnaturelle à forme semi-humaine. Quand la supernova fut observée au ras des eaux de la vaste mer des Sumériens, la réflexion lumineuse sur la surface de l'Océan s'étendit comme un ruban brillant depuis l'horizon du sud jusqu'au littoral. Les habitants de la côte ont réellement cru voir l'étoile qu'ils considéraient comme une divinité s'avancer vers eux en marchant sur l'eau. En tant que dieu mésopotamien, une telle apparition aurait été retenue sous une forme humaine. Etant venue par la voie maritime, elle aurait également projeté une image suggérant les caractères d'un poisson. Nous avons là un modèle ancien des êtres hybrides de la mythologie et du rêve, associé au rayonnement céleste émanant d'une source située près de l'horizon. " (13)

Michanowsky explique encore que l'art mésopotamien représente souvent Oannès associé avec une étoile et que plus tard, dans les mythes ultérieurs, cette légende sera transformée en *un homme céleste surgissant de l'océan* et venant du sud.

L'hypothèse de Michanowsky est très astucieuse, d'autant que certaines de ses conclusions sont troublantes (notamment la présence du pulsar dans le triangle d'étoiles des Sumériens) et comporte probablement une partie de vérité. Il est bien certain que les Anciens, à quelque époque qu'ils aient vécu, ont dû être terrorisés en voyant apparaître *en quelques jours seulement* une étoile aussi brillante que la pleine Lune, et qui brilla durant plusieurs mois comme un phare dans le ciel du sud. Effet garanti ! La baisse d'éclat très progressive et sa disparition ont dû aussi inspirer de nombreuses questions aux Anciens.

Le gros (et quasi insoluble) problème en ce qui concerne l'étoile des Voiles (perpétuée depuis par Vela X) est celui de la datation, car l'époque -4000 ne

tient pas. Tout semble indiquer au contraire une explosion vers -9000, ce qui n'est pas du tout la même chose. Hewish, lui-même, qui a découvert les pulsars, semblait admettre vers 1975 que la corrélation entre la période des pulsars et leur ancienneté n'était peut-être pas obligatoire dans tous les cas, mais cette exception concernant Vela X n'a jamais été confirmée. D'un autre côté, la très importante dispersion de la nébuleuse Gum semble également indiquer une explosion remontant bien à 11 000 ou 12 000 ans.

Exit donc la liaison génétique entre la supernova des Voiles et la légende d'Oannès, à moins que cette légende ait survécu dans l'imaginaire et les traditions des Anciens à la suite d'une transmission *orale* durant 5000 ans (200 générations en gros) avant d'être enfin traduite *par écrit* par les premiers utilisateurs de l'écriture. Peut-être une autre nova ou supernova plus tardive, issue de la même région du ciel, pourrait expliquer la légende et l'explication de Michanowsky, mais nous ne le saurons probablement jamais.

Cet auteur rappelle, à juste titre, l'effet produit sur Hipparque (v. 190-v. 126) et ses contemporains par l'apparition d'une étoile nouvelle (une simple *nova*) en -133. L'événement parut si fabuleux qu'il encouragea Hipparque à entreprendre son fameux catalogue de positions d'étoiles (il en retint 1025), le premier du genre, pour permettre à ses successeurs de comparer si elles évoluaient, oui ou non, dans le temps en position et en éclat (il les classa pour la première fois en six "grandeurs", nos magnitudes d'aujourd'hui).

Si un petit doute subsiste concernant cette affaire, les scientifiques, par contre, écartent toute possibilité d'évolution "psychique" et encore moins "génétique" qui serait en rapport avec des *radiations* en provenance de l'étoile. A grande échelle, l'impactisme particulière n'est réellement dangereux que durant les périodes où la magnétosphère ne joue pas son rôle de bouclier. Que ce soit il y a 6000 ans ou 11 000 ans, aucune disparition de cette magnétosphère n'a été signalée par les géophysiciens. Quant à la couche d'ozone, il est probable qu'elle a dû avoir du mal à neutraliser les rayons cosmiques associés à la supernova, mais compte tenu de l'éloignement de l'étoile, les risques de catastrophe globale *à l'échelle humaine* étaient quand même relativement limités et les mutations génétiques quasiment nulles.

1916-1988 : le mythe de la météorite géante de l'Adrar

L'histoire de cette célèbre météorite fantôme à laquelle trois noms restent étroitement attachés, ceux de Gaston Ripert (1881-1957), Alfred Lacroix (1863-1948) et surtout Théodore Monod (1902-2000) qui lui a consacré un petit livre passionnant : *Le fer de Dieu* (14) (écrit en collaboration avec la minéralogiste Brigitte Zanda), mérite d'être rapidement racontée, car elle est exemplaire. Pendant plus de 70 ans, elle a été un point d'interrogation irritant pour les spécialistes, même si beaucoup n'y croyaient plus depuis

longtemps, à commencer par Théodore Monod lui-même, qui dès les années 1930 faisait partie des sceptiques, après une visite infructueuse de plusieurs semaines sur le terrain.

On s'est longtemps demandé si la sidérite de Hoba, découverte seulement en 1920 en Namibie, était bien la plus grosse météorite terrestre et s'il était possible qu'on en retrouve encore de plus grosses dans un désert encore inexploré (15). Et surtout, les spécialistes se demandaient quel pouvait être le diamètre maximal d'une météorite après son impact à la surface terrestre.

Personne n'envisageait véritablement qu'un objet d'une centaine de mètres puisse survivre sans fracturation à la traversée de l'atmosphère, jusqu'au moment où, au début des années 1920, un certain Ripert, capitaine de l'armée française résidant professionnellement à Chinguetti dans le Sahara mauritanien dans les années 1916-1917 raconta au minéralogiste Lacroix (16) avoir recueilli une météorite de 4,5 kg en 1916 " *sur une énorme masse métallique mesurant une centaine de mètres de côté et une quarantaine de mètres de hauteur* ". Les indigènes et les forgerons de la région la considéraient comme étant d'origine météoritique et l'appelaient le " *fer de Dieu* ". Ripert précisa que la sidérite géante se dressait au milieu de dunes et qu'elle avait la forme d'un parallélépipède compact et sans fissure.

Lacroix fit remarquer qu'en admettant une valeur de 40 mètres pour la troisième dimension qui n'avait pu être mesurée, on se trouvait en présence d'un bloc métallique d'un volume de 160 000 m³ et d'une masse d'environ 1 million de tonnes, ce qui était phénoménal pour une météorite. Pour le petit fragment qu'il examina, il indiqua la composition suivante : 80 % de fer et de nickel et 20 % de silicates. Il s'agissait donc bien d'une sidérite, et l'on pouvait supposer que la composition était la même pour l'énorme bloc.

A partir de 1930, si des doutes apparurent sur l'existence même de la météorite qui ne fut pas retrouvée par les voyageurs de passage dans la région, de nombreux scientifiques croyaient encore à sa réalité. Jean Bosler (1878-1973), un astronome français, qui a été indirectement impliqué dans cette affaire, écrivit dans un compte rendu, après avoir rencontré Ripert en 1932 (17) :

" M. Ripert estime qu'il n'y a point de doute : la grosse météorite vue par lui en 1916, près de Chinguetti (Adrar) était métallique, ce qui écarte l'hypothèse émise un moment d'une roche terrestre émergeant des sables sur laquelle se serait trouvé, par hasard, le petit bloc de 4,5 kg analysé en 1924 par M. A. Lacroix...

Les indigènes de la région appellent la masse de Chinguetti la "Pierre tombée du Ciel", ce qui prouve bien qu'ils en soupçonnent la véritable nature. En tout cas, elle était déjà là, il y a cinquante ans et les forgerons arabes en extraient couramment du fer pour le travailler ; ceci explique, dans une certaine mesure, l'importance qu'ils attachent à ce que les

Européens ne viennent pas, d'une manière ou d'une autre, les évincer d'une "mine" considérée par eux comme leur appartenant.

Il serait intéressant de voir si les nombreux fers météoriques dont la région est parsemée possèdent ou non la même composition que le bloc de 4,5 kg analysé par M. Lacroix. "

Bosler, qui n'avait jamais été sur le terrain, s'avavançait sérieusement en prétendant que " *les forgerons arabes en extraient couramment du fer pour le travailler* " car, en fait, personne sur place ne semblait connaître une telle "montagne de fer", surtout si facile d'accès.

Théodore Monod entra en scène deux ans plus tard, à l'occasion d'une longue mission au Sahara occidental effectuée en 1934-1935. Il était alors assistant au Muséum national d'Histoire naturelle, mais aussi un chercheur polyvalent (un vrai naturaliste) passionné de voyages. A peine arrivé à Chinguetti, le 5 juin 1934, il fit apposer l'affiche suivante (18) :

" Aux habitants de la région de Chinguetti "

" Le résident, chef de la subdivision de Chinguetti, fait connaître à tous que le gouvernement a appris qu'il y avait dans la région de Chinguetti une très grande pierre tombée du ciel il y a très longtemps. Cette pierre est en fer, elle est aussi grosse qu'une maison ; au sommet, elle porte plusieurs pointes et si l'on frappe sur ces pointes on ne peut pas les briser mais seulement les plier. La pierre se trouverait à l'est ou au sud-est de Chinguetti, dans les dunes couvertes de sbot : on l'appelle la "pierre tombée du ciel" ou le "fer de Dieu". Le gouvernement a envoyé dans la région Monsieur Monod pour étudier l'affaire et annonce que la personne qui conduira Monsieur Monod à la pierre, que celui-ci recherche, recevra, au bureau de la Résidence, la somme de mille francs. "

Chinguetti, le 5 juin 1934.

Ce fut un fiasco complet, Monod ne trouva personne pour le renseigner ou l'aider, malgré l'annonce d'une prime intéressante, et la météorite géante resta introuvable. Dès cette époque, il fut à son tour intimement persuadé de l'inexistence de la météorite, déjà soupçonnée par ses prédécesseurs tout aussi bredouilles.

Des reconnaissances furent effectuées par d'autres voyageurs et par des militaires entre 1938 et 1980, mais toujours avec le même résultat négatif. Théodore Monod lui-même, désireux d'en avoir le cœur net une bonne fois pour toutes, reprit ses recherches en 1987 (à l'âge de 85 ans !) et en 1988, avec deux expéditions dans l'année. Malgré un ratissage de toute la région, il n'obtint aucun résultat nouveau, si ce n'est cependant qu'il "identifia" la montagne (soi-disant métallique) observée par Ripert en 1916. Il s'agit d'un

" relief rocheux d'une quarantaine de mètres de hauteur, nommé *guelb Aouinet* ou *tarf Aouinet* ", constitué en fait de grès et de quartzites et qui n'a strictement rien à voir avec un objet d'origine cosmique.

" Pour Théodore Monod, la question ne se pose plus, Ripert qu'il a toujours soupçonné d'avoir, sinon affabulé, du moins romancé sa découverte, est venu par ici, a contemplé la roche d'un peu loin, l'a associée au petit bloc météoritique ramassé. " (19)

En fait, il semble aujourd'hui impossible qu'un corps céleste d'un diamètre supérieur à une vingtaine de mètres (même une sidérite) puisse arriver à traverser l'atmosphère sans dommage (désintégration ou fracturation). L'inexistence de la météorite géante de l'Adrar n'est donc pas une surprise, elle est tout simplement logique.

Il faut noter encore que la météorite d'Aouinet (le morceau de 4,5 kg ramassé par Ripert et étudié par Lacroix) ne peut pas avoir de liaison génétique avec le cratère météoritique d'Aouelloul situé seulement à une vingtaine de kilomètres. Celui-ci a été daté de 3,2 millions d'années, alors que la météorite possède un âge terrestre de 300 000 ans seulement et est donc beaucoup plus jeune. On la considère de nos jours comme une mésosidérite riche en fer plutôt que comme une authentique sidérite.

Cycles cosmiques et groupements et alignements de planètes

J'ai expliqué au chapitre 1 que, très tôt dans l'histoire, les Anciens se sont persuadés du bien-fondé de l'astrologie planétaire et de l'importance des cycles cosmiques et aussi de celle des groupements et des alignements de planètes. La fameuse *Grande Année* était l'un des éléments primordiaux de leur histoire et chaque géomètre de renom a tenté de la mesurer et donc de dater son début et sa fin. On sait que chacun de ces savants de l'Antiquité avait "sa" propre valeur (quelques milliers d'années en général) et ses propres dates, données obtenues de façon totalement arbitraire et sans aucune justification.

Qu'en est-il de ces cycles cosmiques et de ces alignements à la lumière des connaissances modernes ? Dans son livre *Mathematical astronomy morsels* (20), l'astronome belge Jean Meeus a calculé tous les *groupements* de planètes pour une période de 4000 ans (0-4000). Le résultat est éloquent et définitif : il n'y a pas d'alignements possibles de toutes les planètes comme le prétendait Bérosee, et les groupements sont rarissimes. Meeus a calculé pour les huit planètes principales (Pluton est exclu) tous les groupements réels à l'intérieur d'un secteur héliocentrique de 90° (un quadrant centré sur le Soleil représentant le quart de la voûte céleste) et il a trouvé seulement 39 cas au total, ce qui est très peu : 10 au premier millénaire, 7 seulement pour le deuxième, 7 également pour le troisième et 15 pour le quatrième.

Trois groupements sont assez remarquables puisqu'ils sont circonscrits à l'intérieur d'un secteur inférieur ou égal à 50°. Deux ont déjà eu lieu, ce sont celui du 11 avril 1128 avec un secteur minimum de 40° et celui du 14 avril 1307 avec un secteur minimum de 46°. Le troisième aura lieu seulement le 31 juillet 3171 avec un secteur de 50°. Je précise que ces "groupements" concernant des planètes qui circulent à des distances très différentes du Soleil sont en fait totalement artificiels et n'ont aucune incidence ni effet de marée particulier.

Je rappelle pour mémoire le fameux rapprochement planétaire du 10 mars 1982, médiatisé sous le nom ronflant et grotesque de " *L'effet Jupiter* " (21), annoncé à grand renfort de publicité plusieurs années à l'avance par tous les astrologues et tous les charlatans apparentés. Tous se sont couverts de ridicule en annonçant la fin du monde ou des catastrophes épouvantables. Le 10 mars 1982, les neuf planètes (Pluton inclus) se trouvèrent, comme prévu par le calcul, à l'intérieur d'un secteur héliocentrique de 95° (et donc non retenu dans la liste de Meeus qui se limite à des secteurs de 90°), sans que la face du monde soit changée d'un iota. Tous les gogos apeurés en furent pour leurs frais, s'étonnant parfois que les astrologues aient pu les induire en erreur !

La mise en lumière de cette bizarrerie mathématique, spectaculaire sur le papier mais sans conséquence pour la Terre ou les autres planètes, puisque les effets de marée invoqués pour provoquer les cataclysmes étaient totalement nuls, a quand même eu le mérite de discréditer définitivement cette catégorie de catastrophes imaginaires basées sur les groupements et alignements planétaires qui ne relèvent que du fantasme pur et simple.

Le *millénarisme* souvent invoqué les siècles précédents pour une éventuelle fin du monde ne peut plus s'appuyer sur ces problèmes cycliques. L'ordinateur en prévoyant tout à l'avance (Jean Meeus a tout calculé jusqu'à l'an 4000 !) avec une précision diabolique, a quasiment enlevé le "pain de la bouche" aux charlatans de tout poil, obligés de se rabattre sur des phénomènes *imprévisibles*, comme la venue impromptue (toujours possible) d'une comète ou d'un astéroïde.

Fortes approches annoncées = fin du monde

La multiplication des découvertes d'astéroïdes, et dans une moindre mesure des comètes, débouche obligatoirement sur des fortes approches à venir, quelquefois spectaculaires, et même carrément inquiétantes dans certains cas. Dans cette section, nous allons voir deux cas qui ont défrayé la chronique ces dernières années, et permis à la grande presse de faire des titres accrocheurs, susceptibles de faire "frissonner" leurs lecteurs (et donc de vendre). Le premier concerne la comète P/Swift-Tuttle et le second l'astéroïde 1997 XF11.

La fin du monde du 14 août 2126

Les journaux toujours avides de nouvelles à sensation ont fait leurs choux gras, en 1992 et 1993, de l'annonce d'une *collision possible* avec la Terre de la comète périodique P/Swift-Tuttle le 14 août 2126, en baptisant bien prématurément cette comète de "*Comète de l'Apocalypse*" ou "*Comète de la fin du monde*". De telles annonces sont assez fréquentes, en fait, mais elles n'engagent que leurs auteurs, souvent des mythomanes et des gourous de sectes apocalyptiques, et sont vite oubliées.

Ce qui fut différent avec cette annonce, c'est qu'elle fut faite par Brian Marsden, le directeur du Minor Planet Center, et publiée dans la circulaire n° 5636 de l'Union Astronomique Internationale (UAI) en date du 15 octobre 1992. Marsden n'était pas n'importe qui : il était l'expert mondial n° 1 du calcul des orbites depuis plus d'un quart de siècle, un astronome connu pour sa prudence, et qui connaissait parfaitement le problème des approches des astéroïdes et des comètes aux planètes. C'est lui calcula plusieurs mois à l'avance les instants des impacts des fragments de la comète P/Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994, avec la précision que l'on sait.

S'il publia l'annonce d'une collision possible (titre un peu malencontreux dans lequel le *possible* devint vite *quasi-certitude* pour tous les médias qui vivent de sensationnel), c'est qu'il y avait une raison. Avec les derniers éléments orbitaux calculés de la comète P/Swift-Tuttle, qui fut retrouvée en 1992 seulement, peu de temps avant la fameuse annonce, et 130 ans après le passage de la découverte en 1862, Marsden trouva que cette comète passera *très près* de la Terre en août 2126. Personne n'est en mesure de dire exactement à quelle distance, car cette comète subit des forces non gravitationnelles par nature imprévisibles. Le passage prévu pour le 14 août 2126 peut avoir lieu à 8 heures du matin comme à 20 heures le soir.

Suite à l'émotion provoquée dans le grand public par des articles souvent démentiels et grossis à l'extrême avec des titres racoleurs, de nombreux astronomes furent "réquisitionnés" pour calmer un peu ce délire cométaire et faire comprendre aux médias et à leurs lecteurs qu'approche serrée et collision possible ne veulent pas dire collision certaine et fin du monde. L'astronome belge Jean Meeus publia le texte suivant (22) en réponse à l'annonce trop rapide de la catastrophe à venir dans une revue astronomique de son pays :

" Marsden n'a jamais dit qu'en 2126 la comète entrera en collision avec la Terre. Il a donné cette date comme date de collision *possible*. Mais quelle est la probabilité d'une collision en 2126 ? Pour qu'il y ait effectivement collision, il faudrait que les deux conditions suivantes soient satisfaites *simultanément* :

a) il faudrait que la plus courte distance entre les deux *orbites* (celle de la comète et celle de la Terre) soit inférieure à 6378

kilomètres, valeur du rayon de la Terre. Si la plus courte distance est supérieure à cette valeur, aucune collision n'est évidemment possible !

Quelle sera cette plus courte distance ? Il est possible que Marsden l'ait calculée, mais je n'ai jamais vu de valeur publiée. Lors du retour précédent (1862), la plus courte distance entre les deux orbites (et non pas entre les deux astres eux-mêmes !) était de 670 000 km, la comète passant à l'*extérieur* de l'orbite terrestre. Pour le retour actuel (1992), la distance minimale entre les orbites est de 150 000 km, la comète passant cette fois à l'*intérieur* de l'orbite de la Terre.

b) la seconde condition est que la comète et la Terre passent pratiquement *simultanément* au point de plus grand rapprochement. Or, la Terre ne met que *huit minutes* pour parcourir, sur son orbite, une distance égale à son propre diamètre (12 756 km). La Terre ne se trouve que pendant huit minutes dans la région "dangereuse" ! Non seulement cela représente une très faible probabilité pour une collision, mais en outre il est parfaitement impossible de prédire, à huit minutes près, l'instant de passage de la fameuse comète en l'an 2126. Alors, que l'on ne vienne pas raconter qu'en 2126 la comète sera sur une "orbite de collision" avec notre Terre... "

P/Swift-Tuttle est une comète très remarquable, liée génétiquement, on le sait, aux *Perséides* qui illuminent chaque année notre ciel nocturne du 10 au 12 août. Elle fut déjà observée en 1737 en Chine, 125 ans avant sa découverte de 1862. On voit qu'à l'époque la période était de 125 ans, cinq de moins qu'actuellement. Son mouvement est particulièrement difficile à prédire à long terme, du fait d'importantes et irrégulières perturbations liées aux *forces non gravitationnelles*. C'est grâce à Marsden, d'ailleurs, qu'elle put être retrouvée en 1992, alors qu'elle était attendue dix ans plus tôt, en 1982, période à laquelle elle ne put être réobservée, et pour cause...

Le cas de P/Swift-Tuttle n'est qu'un exemple parmi d'autres d'annonce de cataclysme cosmique à long terme menaçant la Terre. Particulièrement en ce qui concerne les comètes actives, par définition des astres souvent imprévisibles, de telles prédictions sont pour le moins prématurées. Et ne faisons surtout pas dire à Marsden qu'il a annoncé la fin du monde. Comme un astronome extraordinairement précis qu'il a toujours été, il a annoncé une forte approche de P/Swift-Tuttle à la Terre le 14 août 2126, ce qui n'est pas la même chose. Cette approche serrée aura lieu, sauf désintégration de la comète d'ici là. Pour la fin du monde, il faudra encore attendre...

L'astéroïde 1997 XF11 et l'approche de 2028

Cet astéroïde a été découvert le 6 décembre 1997 (23) avec le télescope automatique Spacewatch par l'astronome américain James Scotti. C'est un

NEA de sous-type 1 ($a = 1,442$ UA, $e = 0,484$ et $i = 4,1^\circ$) comme on en connaît plusieurs centaines. Le premier intérêt qu'il suscita fut son diamètre : 1,3 km ($H = 17,0$) et son approche possible à la Terre ($D_m = 0,0010$ UA). Un objet très intéressant donc, mais à première vue pas vraiment exceptionnel.

Comme toujours après une telle découverte, les astronomes font tourner les ordinateurs pour voir si l'on doit s'attendre à une forte approche réelle dans les décennies à venir. Et c'est de là que vint la surprise. 1997 XF11 doit nous rendre une visite très serrée le 26 octobre 2028. Brian Marsden annonça une approche *possible* à 42 000 km seulement de la Terre, insistant bien sur la nécessité de nouvelles observations pour affiner ce résultat brut.

Aussitôt les médias du monde entier (presse, télévision, radio) se ruèrent sur cette annonce alléchante, rivalisant de superlatifs, d'autant plus que le cataclysme annoncé doit avoir lieu en 2028, ce qui laisse tout le temps pour s'y préparer. En France, le quotidien *Libération*, qui aime bien commenter les événements scientifiques, fit sa première du vendredi 13 mars 1998 (cette date était le simple hasard, puisque liée à l'annonce de la nouvelle !) avec ce titre : " 26 octobre 2028, Alerte à l'astéroïde. Ce jour-là, un énorme caillou frôlera la terre, sauf si..." et consacrait totalement ses pages 2 et 3 à l'événement (24). Le gros titre de la page 2 sur les cinq colonnes était " *Un astéroïde menaçant se dirige vers la planète terre*". Des interviews, heureusement rassurants des spécialistes Alain Maury et Antonella Barucci, permirent aux lecteurs de tout savoir sur ce qui nous attend.

Alain Maury qui a traqué les NEA pendant des années, et qui connaît parfaitement le sujet qui le passionne depuis toujours, expliquait fort bien la situation :

" C'est un gros, et on n'en a jamais vu passer un si près... Qu'il touche le sol ou l'océan serait spectaculaire. Un impact au sol pourrait détruire en totalité plusieurs départements français. Un choc avec l'Atlantique nord déclencherait un raz de marée qui atteindrait Paris. Dans les deux cas, il injecterait dans l'atmosphère une telle quantité de poussière que le Soleil en serait obscurci six mois à un an. Ce qui provoquerait un "hiver" capable de détruire une saison agricole...

Pour l'instant, la probabilité d'une collision, compte tenu des incertitudes sur la trajectoire, est non nulle, mais faible... Nous sommes certains que l'astéroïde va passer à l'intérieur d'un cercle de 200 000 km de diamètre, où se trouvera la Terre. Imaginez un cercle de 2 m et une cible de 12 cm à l'intérieur. C'est nous. "

Dans cette même double page de *Libération*, fort intéressante, Antonella Barucci s'employait à rassurer les gens et aussi à tempérer l'ardeur des médias :

" Faut-il s'inquiéter ? Une collision avec la Terre serait catastrophique, évidemment. Mais pour l'instant, le calcul ne dit pas que cette collision va survenir. En plus, c'est ce qui est très intéressant et justifie pleinement les opérations de surveillance, nous avons du temps pour réagir. En trente ans, si le risque d'une collision se précise, nous pouvons développer le moyen d'aller détourner la trajectoire de cet objet. Que les médias ne paniquent pas les gens... "

Au-delà du sensationnel, qui passionne ou terrorise le lecteur selon le cas, il y a la réalité incontournable que représente le danger potentiel des approches d'astéroïdes. Dans la double page de *Libération*, Alain Maury concluait d'une façon pragmatique :

" On s'excite sur XF11, mais peut-être que d'autres astéroïdes sont passés bien plus près la semaine dernière... Des astéroïdes, on en découvre toutes les nuits. Loin, dans la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, environ 300 à 400 par nuit. Et une dizaine par mois pour ceux qui vont passer dans la banlieue de la Terre. J'estime qu'à moins de 400 000 km de nous, il y a en permanence une cinquantaine d'objets de plus de 50 mètres de diamètre... Aujourd'hui, on sait que les catastrophes cosmiques ne sont pas réservées au passé. "

Des calculs ultérieurs ont montré que si la très forte approche du 26 octobre 2028 est confirmée, elle sera beaucoup moins serrée qu'annoncée d'après les premiers éléments orbitaux calculés d'une manière précise. Elle ne devrait pas être inférieure à 800 000 km et ne présentera donc aucun danger pour la Terre. Elle n'en demeure pas moins un événement astronomique intéressant que les astronomes ont tout le temps de préparer à loisir.

Les astronomes sont des gens raisonnables qui n'ont pas vocation d'effrayer le commun des mortels, beaucoup plus enclin à paniquer à la moindre annonce sensationnelle. S'ils annoncent un événement *possible*, c'est qu'il résulte de calculs réels, mais qui peuvent être issus d'éléments orbitaux préliminaires, et qui doivent donc être affinés grâce à des observations ultérieures avant de pouvoir être considérés comme définitifs et certains. Malheureusement, dès qu'une information est lâchée dans la presse, elle ne leur appartient plus totalement. Des requins, sous forme de "gourous" auto-proclamés, s'en emparent et l'exploitent au détriment de gogos (complices de leur propre exploitation) qui aiment se faire peur et attendent un monde meilleur. Pour eux, pas de problème : le préliminaire se transforme immédiatement en certitude. Nous verrons un autre triste exemple de la bêtise humaine, lié celui-là à la comète Hale-Bopp, dans la dernière section de ce chapitre.

L'anneau à éclipses de la Terre

Cette hypothèse de l'existence d'un véritable anneau à éclipses autour de la Terre fut présentée par l'astronome danois Kaare Rasmussen au début des années 1990 (25). Il postulait que de nombreux corps célestes (astéroïdes et comètes) qui passent parfois très près de notre planète pourraient se désintégrer et leur matière se satelliser autour d'elle. Pour arriver à cette conclusion étonnante, il avait étudié statistiquement toutes les données disponibles concernant la fréquence annuelle des pluies de météores, des observations de bolides et des chutes de météorites du VIII^e siècle av. J.-C. jusqu'en 1750, c'est-à-dire sur près de 2600 ans. Il retint 747 *pluies* qui lui permirent de tracer une courbe d'évolution dans le temps, mettant ainsi en évidence 44 figures remarquables, dont 16 se distinguaient nettement par leur forme caractéristique en "U", soit un pic, un plat, un pic.

Rasmussen retint le scénario suivant pour expliquer ces cycles en "U" :

1. Après une période calme, l'activité météorique augmente brusquement, dessinant un premier pic. La désintégration d'une comète ou d'un astéroïde, lors de son passage à l'intérieur de la limite de Roche, débouche sur une première activité directe : l'entrée dans l'atmosphère d'une bonne partie de la poussière ainsi créée.
2. Cette activité redescend ensuite lentement vers un taux minimal très bas, inférieur même au taux moyen annuel. Cette période intermédiaire correspond à la formation de l'anneau. Sous l'effet de la force centrifuge liée à la rotation terrestre, les particules de l'anneau se concentrent progressivement dans un anneau de plus en plus plat. C'est le plat du "U".
3. Ensuite, par effet de friction avec les particules de la haute atmosphère, la vitesse des particules de l'anneau diminue, et donc celui-ci perd progressivement de l'altitude. Il finit par se désintégrer et son matériau entre à son tour dans l'atmosphère, créant le deuxième pic d'activité.

D'après Rasmussen, la durée de vie d'un anneau varierait de quelques années à près de deux siècles, avec une durée moyenne de l'ordre de 30 ans. Ses 16 figures principales représenteraient autant d'anneaux qui se seraient succédé sur la période considérée de 2600 ans à la moyenne d'un anneau nouveau formé tous les 160 ans.

Malheureusement pour l'astronome danois, ses confrères ne l'ont pas suivi dans sa démarche et ses résultats, et sa théorie de l'anneau à éclipses de la Terre risque fort de prendre définitivement le chemin des oubliettes. On lui a opposé plusieurs réserves sérieuses. D'abord, la fiabilité de ses données historiques qui sont douteuses parfois et surtout incomplètes. Ensuite, son scénario de formation des anneaux successifs manquerait de crédibilité. La capture des comètes et des astéroïdes et leur satellisation autour de la Terre

ne peuvent être que des événements très rares. Enfin, il n'est pas du tout prouvé qu'un tel objet satellisé se fragmente pour former le fameux anneau, il pourrait tout aussi bien entrer directement dans l'atmosphère et se fragmenter seulement pendant la traversée de celle-ci, ce qui exclurait toute formation d'anneau extra-atmosphérique.

En fait, les spécialistes préfèrent l'explication traditionnelle à celle de Rasmussen pour expliquer à la fois les impacts passés et l'existence permanente des météores. De nombreux corps célestes passent à proximité immédiate de la Terre, tout le monde en est bien d'accord, et parfois la heurtent. Les météores sont les débris de comètes usées qui suivent l'orbite de la comète mère et rencontrent plus ou moins régulièrement (selon les perturbations qui peuvent les rapprocher ou les éloigner) notre planète au point de croisement des orbites. Rasmussen a bien raison de parler d'une poussière cosmique abondante dans le sillage de la Terre autour du Soleil, mais elle appartient au Système solaire lui-même. On ne peut donc pas parler d'anneau au sens propre, c'est-à-dire comparable à ceux des planètes géantes, qui serait satellisé autour de notre planète.

On sait, par contre, qu'exceptionnellement un tel anneau pourrait se former, mais certainement pas tous les 160 ans, comme dans la version optimiste de Rasmussen. Sa formation se ferait très rapidement, peut-être en *quelques jours* seulement. Les fameux anneaux de Saturne, de loin les plus massifs et les plus vastes (300 000 km de diamètre), qui résultent, eux, de la désintégration d'un satellite intérieur, se seraient formés d'après les spécialistes en moins d'un an, c'est-à-dire quasi instantanément à l'échelle astronomique. Ils ne semblent pas pouvoir être détruits dans les quelques millions d'années à venir, mais leur structure varie continuellement au gré des perturbations dues à la planète, mais également aux perturbations mutuelles des fragments principaux qui sont de taille kilométrique.

Élucubrations diverses : décembre 2012, mondes antédiluviens et extraterrestres

Avec ce sujet multiforme, nous sommes là dans le milieu privilégié des ésotéristes qui ont du mal à admettre que notre civilisation ne descend pas d'ancêtres supérieurs et qu'elle est la première à atteindre le niveau culturel, technique et scientifique qui est la sienne. Le monde de l'édition veut aussi sa part du gâteau et relaie sans vergogne des *fantasmes* comme la fameuse fin du monde prévue en décembre 2012 (26/27/28).

J'ai déjà parlé au hasard des chapitres de l'OVNI de Zigel, de la panspermie dirigée de Crick et Orgel, des quatre lunes de Hörbiger et de la cosmogonie des Dogons de Griaule et Temple. Mais il ne faut surtout pas tout confondre. Les grandes catastrophes qui ont eu lieu depuis quelques dizaines de milliers d'années, depuis l'apparition d'*Homo sapiens*, ont eu des causes physiques, terrestres et cosmiques *naturelles*, car, comme je l'ai dit tout au long de ce livre, *l'Univers est violence*, mais absolument rien ne peut les attribuer à l'homme. Parler de conflit nucléaire (29), de la venue d'ancêtres

supérieurs (30), ou plus simplement de visite d'extraterrestres (31) dans le passé n'est rien d'autre que de la mauvaise fiction, et en tout cas qui n'a rien à voir avec la science.

Parler de catastrophes de grande envergure, c'est tout autre chose, comme nous le verrons dans les deux chapitres suivants.

Une hypothèse révolutionnaire : le singe descend de l'homme

On sait que l'avenir est assez sombre pour l'homme sur le plan génétique. Tant et si bien que certains chercheurs se posent des questions. Une future inversion géomagnétique est quasi annoncée pour le IV^e millénaire et ses conséquences seront probablement importantes sur le monde animal et le monde végétal dans leur ensemble. Des radiations accrues sont à prévoir et elles ne seront pas sans conséquences, car elles devraient durer quelques milliers d'années. On s'attend à la disparition de nombreuses espèces, et à la transformation de nombreuses autres.

Pour l'homme, on s'attend aussi à diverses modifications *génétiques*, peut-être même à une modification *chromosomique* que pourraient subir certains individus, sachant que la réaction de l'être humain aux radiations est loin d'être la même pour tous. L'espèce humaine pourrait bien se scinder en deux espèces différentes (non interfécondes). L'homme deviendra-t-il un *surhomme* ou, au contraire, un *être dégénéré* (selon nos critères actuels). Déjà plusieurs savants ne sont pas loin de croire que certains de nos singes actuels ne sont en fait que des hommes dégénérés à la suite d'une ancienne modification substantielle de la biosphère terrestre, il y a quelques millions d'années. Ainsi, l'homme ne descendrait pas du singe, mais ce serait l'inverse...

Même si cette affirmation gratuite, et évidemment non prouvée, peut faire sourire, ce qui est certain c'est que l'homme actuel, aussi sûr de lui soit-il et aussi peu soucieux de l'avenir de sa planète, n'est qu'*un phénomène transitoire* dans l'histoire de la paléontologie. Reste à savoir s'il se détruira lui-même (ce qui paraît assez probable), ou si c'est le cosmos qui aura raison de lui. C'est aussi cela l'histoire cosmique des hommes.

Nous faisons partie de la superfamille des *hominoïdes*, c'est-à-dire les *singes sans queue*, n'en déplaise aux créationnistes qui voient ça d'un très mauvais œil ! C'est vrai qu'il est tentant de rechercher si le cataclysme a pu interférer dans notre grande famille, en promouvant certaines espèces (en les rendant plus résistantes aux aléas extraterrestres), en en supprimant d'autres (en les fragilisant à l'extrême), et surtout s'il a pu permettre le passage à une autre *par mutation chromosomique*.

Les hominidés sont notre famille (32), famille qui remonte à 8 MA environ et qui ne comporte que deux sous-familles : les *paninés* et les *homininés*. La première regroupe trois espèces actuelles : les gorilles, les chimpanzés et les

bonobos, tandis que la seconde ne compte qu'une seule espèce actuelle : l'homme.

" La question est simple : quelles sont les relations de parenté entre les quatre espèces actuelles d'hominoïdes africains que sont l'homme (*Homo sapiens*), le chimpanzé commun (*Pan troglodytes*), le chimpanzé pygmée ou bonobo (*Pan paniscus*) et le gorille (*Gorilla gorilla*) ? " (33)

On sait aujourd'hui qu'il existe une identité génétique de près de 99 % entre l'homme et les deux espèces de chimpanzés (pourcentage qui fera frémir certains), supérieure à celle existant entre les chimpanzés et les gorilles, eux-mêmes faisant pourtant partie de la même sous-famille des *Paninés*. Les données génétiques et moléculaires sont formelles sur ce point. Cela tendrait à prouver que les chimpanzés sont nos seuls cousins vraiment directs.

Les savants du XXI^e siècle devront chercher (et prouver si possible) si les différentes inversions géomagnétiques des huit derniers millions d'années ont conduit à multiplier les espèces (ce qui pourrait être le cas pour les gibbons pour lesquels on différencie dix espèces non interfécondes) et à en créer de nouvelles. Ainsi les chimpanzés pourraient être issus d'une mutation *régressive* à partir du dernier ancêtre commun. *Homo* serait parti dans la "bonne direction" et *Pan* dans la "mauvaise". En très peu de milliers d'années, le gouffre se serait creusé d'une manière irréversible.

Cette éventualité n'a rien d'in vraisemblable pour un catastrophiste moderne. Comme je l'ai expliqué au chapitre 15, puisque le catastrophisme d'origine cosmique est l'un des moteurs de l'évolution. La "*gestion des espèces* (le "bruit de fond" de l'extinction) pourrait bien être liée à l'impactisme particulière, alors que les extinctions importantes seraient plutôt associées à l'impactisme macroscopique. Si l'on veut bien admettre cette possibilité, et la *malchance* aidant (cette malchance avec laquelle tous les scientifiques devront compter maintenant), les chimpanzés pourraient donc être des préhominiens mutés dans une direction régressive.

On ne peut pas dire pour autant que *le singe descend de l'homme*, et c'est la raison de la présence de cette section dans le chapitre "*Fausse pistes*". Les *hominoïdes* et les *cercopithécoïdes*, les deux superfamilles de singes, existaient bien avant *Homo*. Il serait plus juste de dire que *Homo* est un singe "qui a réussi" parce que, lui, a eu de la chance. Il a réussi provisoirement, car ses divers cousins (moins d'une centaine d'espèces au total, ce qui est peu) ont une très grande chance de lui survivre. Les spécialistes pensent même qu'à long terme les *cercopithécoïdes*, les singes primitifs, avec leur queue animale, pourraient fort bien supplanter définitivement les hominoïdes, qui seraient déjà quasiment entrés dans une période de *régression*, prélude à leur disparition totale (34).

L'Apocalypse : le fantasme des sectes religieuses

L'avenir sombre qui nous attend monte déjà à la tête de certains qui voudraient voir arriver une apocalypse anticipée, dans laquelle ils seraient eux-mêmes acteurs. C'est le fantasme cosmique de sectes religieuses. Nous avons vu que le phénomène n'est pas nouveau, puisque des prêcheurs ont toujours annoncé une fin du monde proche, il est de tout temps.

Principalement liée aux cycles cosmiques, l'Apocalypse est quasiment devenue un phénomène de société, de fuite en avant, pour un nombre sans cesse accru de personnes mal dans leur peau. L'exemple de ce qui s'est passé le 26 mars 1997 dans une villa de San Diego, en Californie, en liaison avec l'arrivée dans la banlieue solaire de la belle comète Hale-Bopp, est révélateur à ce sujet. Ce lamentable épisode de la bêtise humaine, qui a fini par un suicide collectif sans précédent, a montré l'extrême fragilité psychologique de certains individus devant "l'appel cosmique" (sic !).

Pas moins de 38 personnes (17 hommes et 21 femmes) regroupées dans une secte au nom pompeux et grotesque "*La Porte du Ciel* " et manipulées par un gourou fou et démoniaque, qui promettait à ses adeptes d'atteindre "le niveau supérieur" (sic !), ont accepté sans trop d'état d'âme de se suicider avec la motivation et les arguments suivants qui leur ont paru suffisants :

" Nous sommes venus d'un espace lointain et nous avons maintenant quitté les corps que nous revêtions pour notre tâche terrestre, pour retourner vers le monde d'où nous venons, tâche accomplie. Cette distance de l'espace à laquelle nous nous référons est celle que votre littérature appelle le royaume des Cieux ou le royaume de Dieu...

Vous pouvez nous suivre, mais vous ne pouvez rester ici. La planète Terre va bientôt être recyclée. Votre seule chance de survivre ou d'être évacué est de partir avec nous...

Les clés du ciel sont présentes comme elles l'étaient avec Jésus, il y a 2000 ans...

Alerte rouge... Hale-Bopp annonce la fin. " (35)

Tâche accomplie, Terre recyclée... Cette prose, réellement affligeante, à laquelle ont souscrit près de 40 personnes de 18 à 72 ans qui ont accepté de sacrifier leur vie et de partir pour un "dernier voyage", au nom d'un millénarisme moyenâgeux mâtiné de religion, laisse perplexes les personnes rationnelles et de bon sens. Et ce n'est qu'un exemple, même si le plus souvent, heureusement, les adeptes des sectes millénaristes n'en arrivent pas à une telle extrémité. Ils se contentent d'attendre (et d'espérer parfois) la fin du monde.

Nous avons vu plus haut que deux événements annoncés, les très fortes approches à la Terre à venir de l'astéroïde 1997 XF11 en 2028 et de la comète P/Swift-Tuttle en 2126, étaient là pour prendre la relève. Ils sont un peu dépassés aujourd'hui par Apophis, l'astéroïde qui va frôler la Terre en 2029. Et il y en aura bien d'autres dans les décennies à venir. Les sectes apocalyptiques ont encore de beaux jours devant elles.

Notes

1. I. Velikovsky, *Mondes en collision* (Stock, 1951). Titre original : *Worlds in collision* (1950). Classique du catastrophisme non scientifique, ce livre a fait plus de mal que de bien pour la cause du catastrophisme. Les astronomes n'ont eu aucun mal à montrer que l'hypothèse de Velikovsky ne tenait pas debout. Le côté historique du livre, par contre, est très intéressant et contient une foule de détails utiles et un système de notes et de références développé.

2. Editors of *Pensée*, *Velikovsky reconsidered* (Abacus, 1978). Ce livre plusieurs fois réédité voulait faire passer Velikovsky pour un martyr de la science. " *Velikovsky - The most unjustly maligned scientist since Galileo ?* " titre la page 4 de couverture. Mais les éléments apportés dans ce livre ne sont pas (ne peuvent pas être) concluants.

3. A. de Grazia, *The Velikovsky affair* (Abacus, 1978). Autre livre à la gloire de Velikovsky, mais comme le livre précédent, il n'apporte aucun élément concluant sur le plan scientifique, puisque l'hypothèse de Velikovsky est fautive. Vénus n'a jamais été une comète.

Alfred de Grazia est le père de la *quantavolution*, une théorie nouvelle et une autre façon de concevoir l'évolution et d'appréhender les changements culturels qui ont eu lieu dans l'Antiquité. Il a publié une collection en quinze volumes, intitulée *Quantavolution & Catastrophes*. En 2006, il a publié *The Iron Age of Mars* (Metron Publications).

Son épouse, Ami de Grazia, en le traduisant de l'allemand en anglais, a sorti de l'oubli le livre de Johann Gottlieb Radlof (1775-1846) *The shattering of the great planets Hesperus and Phaethon* (Eumetron Publications, 2006), paru en Allemagne en 1823 à l'époque où Cuvier prônait un catastrophisme sans partage. Le premier, Radlof a relié les textes catastrophistes de l'Antiquité et le mythe de Phaéon à la fois aux destructions par le feu et aux déluges qui ont dévasté la Terre et détruit les anciennes civilisations victimes de ces fléaux. Il a fortement inspiré Donnelly et Velikovsky.

4. Y. Riabov, *Les mouvements des corps célestes* (Mir, 1967).

5. F. Derrey, *La terre, cette inconnue* (Planète, 1964).

6. E. von Däniken, *Mes preuves. Cinq continents témoignent* (Albin Michel, 1978). Titre original : *Beweise. Lokaltermin in fünf kontinenten* (1977). Un classique de l'ésotérisme qui n'a jamais convaincu les scientifiques. Däniken prend souvent ses désirs pour des réalités.

7. M. Griaule et G. Dieterlen, *Un système soudanais de Sirius*, Journal de la Société des Africanistes, t. XXI, fasc. 1, 1951.
8. R. Temple, *The Sirius mystery* (Destiny, 1987).
9. Ph. de La Cotardière, *Dictionnaire de l'astronomie* (Larousse, 1996). Citation article *Sirius*, p. 357.
10. G. Michanowsky, *Le retour de l'étoile de Sumer* (Albin Michel, 1980). Titre original : *The once and future star* (1977). J'insiste un peu sur ce livre car il aurait pu avoir un impact incroyable si les conclusions de l'auteur s'étaient avérées les bonnes.
11. G. Michanowsky, op. cit., pp. 30-31.
12. G. Michanowsky, op. cit., pp. 66-67.
13. G. Michanowsky, op. cit., p. 74.
14. Th. Monod et B. Zanda, *Le fer de Dieu. Histoire de la météorite de Chinguetti* (Actes Sud, coll. Terres d'aventure, 1992). Ce petit livre passionnant raconte dans le détail et avec de nombreux documents inédits l'histoire de la pseudo-météorite de l'Adrar.
15. Dans *La Terre bombardée* de 1982, j'écrivais (p. 82) : " *Il est possible qu'on en connaisse une nettement plus importante, mais malheureusement, si elle existe vraiment, elle est actuellement enfouie sous les sables du désert saharien* ". Des doutes très sérieux existaient depuis longtemps sur l'existence réelle de cette météorite géante, dont le diamètre supposé paraissait trop important pour qu'elle ait pu disparaître sous les sables dans un délai aussi court.
16. A. Lacroix, *Sur un nouveau type de fer météorique trouvé dans le désert de l'Adrar en Mauritanie*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 179, 5, 1924. Il s'agit du premier document scientifique sur le "fer de Dieu", écrit huit ans après la découverte de la météorite.
17. Document publié dans *Le fer de Dieu*, pp. 54-55.
18. Document publié dans *Le fer de Dieu*, pp. 11-12.
19. *Le fer de Dieu*, pp. 93-94. Th. Monod a publié une note à l'Académie des sciences en 1989, dans laquelle il conclut à une erreur d'interprétation de Ripert et à la non-existence de la météorite géante de l'Adrar.
20. J. Meeus, *Mathematical astronomy morsels* (Willmann-Bell, 1997). Un recueil de "morceaux choisis" parmi plusieurs centaines d'articles écrits par l'astronome belge Jean Meeus.

21. J. Meeus, *Un alignement de planètes ?*, L'Astronomie, 95, pp.15-19, 1981.
22. *Revue du Cercle Astronomique de Bruxelles*, 71, p. 1, février 1993.
23. J.V. Scotti, *Fleeting expectations: the tale of an asteroid*, Sky and Telescope, 96, 1, pp. 30-34, july 1998.
24. *Libération* n° 5230 du 13 mars 1998. Trois pages sont consacrées à l'événement.
25. J. Guillaume, *L'anneau à éclipses de la Terre*, Science et Vie, 890, pp. 26-32, 1991.
26. D. Jamet et F. Mottez, *2012, scénarios pour une fin du monde*, Belin - Pour la Science, 2009.
27. A. Cirou, *2012, la fin du monde n'aura pas lieu*, Saint-Simon, 2010.
28. B. Bourdeix, *2012 et les fins du monde*, Fetjaine, 2011. Un livre complet et très intéressant qui rappelle les différentes prédictions et peurs du passé concernant la fin de notre monde. On y trouve une importante bibliographie internet, notamment par l'intermédiaire de wikipedia.org/wiki.
29. R. Charroux, *Le livre des secrets trahis* (Robert Laffont, 1965).
30. R. Charroux, *Histoire inconnue des hommes depuis cent mille ans* (Robert Laffont, 1963). Le premier livre de Robert Charroux (1909-1978), véritable fourre-tout des mystères et pseudo-mystères recensés. Plusieurs autres auteurs ont écrit des livres sur ces pseudo-mystères, sans y croire vraiment, mais dans un but commercial.
31. R.E. Mooney, *Les dieux de l'espace et des ténèbres* (Plon, 1976). Titre original : *Gods of air and darkness* (1975).
32. *Historia Spécial*, *Les origines de l'homme*, HS 50, novembre-décembre 1997.
33. V. Barriol, *Des molécules entre les singes et l'Homme*, op. cit., pp. 21-22. Citation p. 21.
34. P. Picq, *Classer les familles n'est pas un jeu d'enfant*, op. cit., pp. 26-29
35. L. Zecchini, *Le suicide collectif de 39 personnes en Californie a été méticuleusement planifié et exécuté*, Le Monde, 29 mars 1997, p. 3.

CHAPITRE 18

CATACLYSMES TERRESTRES DANS L'ANTIQUITÉ

Des cataclysmes nombreux et variés

La Terre est une planète parmi d'autres. Elle a la particularité d'être *vivante*, ce qui veut dire que rien n'est figé, ni à sa surface, ni dans son intérieur (jusqu'au noyau), ni évidemment dans l'atmosphère et la biosphère. Le changement est continu, le cataclysme aussi.

Nous savons que l'interaction avec le milieu extérieur est également permanente, notamment avec l'impactisme particulière qui peut varier d'un jour à l'autre selon les caprices du Soleil, maître *local* incontesté, qui dicte sa loi sans partage. Ces innombrables interactions, qui souvent ne sont pas détectables par les êtres humains, dont les capacités d'enregistrement sont très restreintes, débouchent quand même à l'échelle humaine sur des grandes catastrophes. Pas une seule génération depuis l'apparition d'*Homo sapiens* n'a pu éviter un cataclysme destructeur, que ce soit un séisme, une éruption volcanique, une inondation catastrophique, une désertification locale, la montée des eaux océaniques, ou autre. Cependant, toutes ces catastrophes *ordinaires* furent vite oubliées. Seuls les très grands cataclysmes avaient une chance de perdurer dans la conscience collective et de résister, tant bien que mal (et plutôt mal que bien !) à l'usure du temps.

Ces très grands cataclysmes terrestres depuis 20 000 ans, quels sont-ils ? En fait, depuis l'Antiquité jusqu'à la fin de la première partie du XX^e siècle, on n'avait jamais pu identifier et dater avec précision le moindre de ces cataclysmes de grande envergure, faute de preuves convaincantes et de textes suffisamment explicites. On les connaissait depuis toujours juste par leur nom et par bribes : Apocalypse, Chaos, Déluge, Atlantide, Ragnarök, toutes les religions et traditions des peuples anciens retenant au moins l'un de ces cataclysmes, souvent infligé aux hommes comme punition par le dieu principal, bien peu miséricordieux en l'occurrence. Souvent ils terminaient un âge du monde dans l'imaginaire des Anciens.

La seconde moitié du XX^e siècle a permis des progrès décisifs et certains cataclysmes ont pu être datés avec précision, notamment l'explosion du Santorin, axe central du catastrophisme de l'Antiquité. Ce progrès fondamental a permis de clarifier une partie des mystères du passé et d'établir une *chronologie relative* entre eux, impossible auparavant puisque des catastrophes très diverses se retrouvaient regroupées en une seule par la compression du temps (dans *l'Apocalypse* de Saint Jean, par exemple). C'est d'ailleurs la raison d'être de ce chapitre destiné à séparer les cataclysmes terrestres des cataclysmes d'origine cosmique.

Les techniques de datation, d'abord basées sur les propriétés du carbone 14, se sont diversifiées et avérées d'une précision inespérée. Ces datations anciennes affinées ont à leur tour posé des problèmes imprévus aux historiens en bouleversant l'ancienne chronologie des différentes civilisations de l'Antiquité et de la Protohistoire (1/2), comme celle des *mégalithes* notamment, plus vieille de 2000 ou 3000 ans que prévu jusqu'alors.

Tous les scientifiques sont d'accord pour admettre la réalité de certains des grands cataclysmes retenus par la tradition. Un seul paraît réellement d'envergure mondiale : c'est *la fin de la glaciation et la déglaciation associée* qui a eu des conséquences inimaginables. Mais ce cataclysme a surtout été remarquable par sa durée et il ne peut être comparé à un cataclysme de quelques jours comme une éruption, de quelques minutes comme un séisme ou de quelques secondes comme un impact.

Cela nous interpelle et montre bien qu'un cataclysme n'a pas forcément des conséquences immédiates et qu'il peut jouer *sur la durée*, comme une déglaciation ou plus encore une inversion géomagnétique, peu gênante pour la Terre elle-même mais catastrophique pour la biosphère en général, et pour l'homme en particulier. Bonne leçon à méditer pour l'homme qui a introduit lui-même, et un peu inconsidérément, depuis le début de l'ère industrielle deux nouvelles sources possibles de cataclysmes, préoccupants à moyen terme : le cataclysme *technologique* (Tchernobyl et centrales nucléaires obsolètes dangereuses, satellites nucléaires, chimiques et bactériologiques) et le cataclysme *écologique* (effet de serre, ozone).

Dans les sections suivantes, je vais étudier quelques-uns de ces grands cataclysmes terrestres du passé, qui sont loin d'avoir tous la même importance. J'insisterai surtout sur la déglaciation, sur la transformation complète de la géographie mondiale et sur le cataclysme clé que représente l'éruption cataclysmique du Santorin vers -1600. Bien sûr, de nombreux autres cataclysmes importants restent pour le moment ignorés, surtout ceux qui ont eu lieu dans des régions éloignées du centre culturel principal que fut le Bassin méditerranéen.

Un événement majeur : la dernière déglaciation

La dernière déglaciation est la catastrophe majeure engendrée par la Terre elle-même sur le plan géophysique (au sens large) depuis 20 000 ans. Mais quand on fait un bilan à long terme, pourtant, il n'est pas évident que la déglaciation ait débouché sur des conséquences *negatives* au plan humain, puisqu'elle a contribué à la montée de l'homme préhistorique vers son niveau actuel, à travers plusieurs étapes que l'on peut qualifier, globalement, de constructives. Mais pour des générations successives d'humains, le recul obligatoire et sans cesse répété devant la montée des eaux a dû être le fléau majeur, celui qui a empêché les populations de se fixer sur les rivages océaniques, continuellement remis en cause.

Il est nécessaire de diviser l'histoire de la déglaciation en plusieurs étapes chronologiques, pour bien saisir les divers aspects successifs d'un cataclysme terrestre de très grande ampleur, mais il faut rappeler d'abord ce que recouvre la notion d'*inondation* et de *déluge*.

Inondations et déluges

Les plus vieux récits de l'humanité conservent le souvenir d'inondations catastrophiques, notamment sous l'appellation passe-partout de *déluges* (3). Ces inondations sont de tout temps et eurent des causes multiples. Mais certaines furent particulièrement impressionnantes et ont laissé des traces indélébiles encore visibles et exploitables aujourd'hui. Sur la terre ferme, elles sont étudiées par les géologues. Celles qui ont laissé des traces sous-marines sont étudiées par les océanographes. Car les inondations ne sont pas seulement celles dues aux précipitations ou à la colère des fleuves, elles sont aussi liées à la montée inexorable du niveau des eaux océaniques, consécutive à la dernière déglaciation générale. Les continents ont été progressivement inondés, obligeant les populations qui vivaient en bordure de l'océan à reculer progressivement au fil des générations.

Le XX^e siècle a permis des observations nouvelles et fondamentales, notamment celles concernant la profondeur des fonds marins tout le long des côtes. Des surprises de taille sont apparues et ont confirmé que la géographie actuelle n'a strictement rien à voir avec celle d'il y a 15 000 ans. La Manche et la mer du Nord n'existaient pas, et surtout la mer Noire (alors *lac d'eau douce*) ne communiquait pas avec la Méditerranée.

On peut imaginer l'incroyable cataclysme, incompréhensible pour tous les contemporains de l'événement, quand l'eau en provenance des glaciers scandinaves en débâcle commença, à partir de -6700, après avoir traversé la mer Noire, à *déborder vers le sud*. Elle s'engouffra à travers le passage nouvellement créé (quelques siècles plus tôt) par la montée des eaux, empruntant successivement le détroit du Bosphore, la mer de Marmara (dépression naturelle de près de 1000 mètres de profondeur qui fut tour à tour *lac* ou *mer* selon les époques), le détroit des Dardanelles avant de rejoindre la mer Egée.

C'est ce cataclysme que l'océanographe belge André Capart (1914-1991) a associé au *déluge de Noé* dans un livre extraordinaire : *L'homme et les déluges* (4), paru en 1986. Son épouse, Denise Capart (1918-2011), ethnologue et archéologue, a cherché les réminiscences humaines de ce drame *humain* tout autant que géologique qui, associé avec quelques autres de moindre importance, a laissé le souvenir de cataclysmes gigantesques causés par l'eau. Les Grecs le savaient bien : l'eau et le feu sont parfois des ennemis, responsables de la fin des âges de la nature, épisodes naturels du monde *cyclique* et éternel qu'ils enseignaient, comme je l'ai rappelé au chapitre 1.

Le dernier maximum glaciaire

Les spécialistes des paléoclimats (5/6) situent le dernier maximum glaciaire entre -25000 et -17000 ans. C'est donc à cette époque que s'est constituée la fameuse terrasse sous-marine de -110 mètres, profondeur maximale (pour le Quaternaire). Ce niveau -110 mètres a été retrouvé dans le monde entier (à quelques mètres près selon les régions). L'océan s'y est maintenu pendant plusieurs milliers d'années, comme le montre l'étude minutieuse du talus continental. C'est la grande époque du *Pléniglaciaire*, contemporain du *Paléolithique* supérieur, avec ses civilisations bien connues : le Moustérien, d'abord, puis l'Aurignacien, le Gravettien et le Solutrén.

Les masses glaciaires sont alors énormes, atteignant un volume total de près de 75 000 000 km³ contre 26 000 000 km³ de nos jours, soit trois fois moins. Ainsi les *deux tiers* des glaciers ont disparu depuis, et parallèlement la remontée globale du niveau marin a été de 110 mètres.

Réchauffement et montée des eaux

C'est entre -17000 et -15000 qu'eut lieu un premier réchauffement (dit solutrén) et une première fonte des glaces les plus exposées. Parallèlement, démarra une remontée du niveau de la mer, lente mais inexorable, qui grignota le talus continental jusque-là préservé des effets mécaniques de l'érosion marine. Ce fut aussi le début de l'exode pour les tribus qui vivaient paisiblement au bord de la mer, où ils trouvaient facilement leur nourriture grâce à la pêche de poissons et de petits crustacés.

C'est en -13500, alors que le niveau marin était à -80 mètres (il avait déjà progressé de 30 mètres par rapport au niveau plancher), que se produisit une première débâcle, dite *débâcle atlantique* ou *Déluge de Lascaux*. La déglaciation s'accéléra soudainement avec l'éclatement définitif de la calotte glaciaire qui recouvrait tout le nord de l'Europe et qui bloquait surtout toute circulation maritime dans la mer du Nord que nous connaissons. Les glaciologues pensent que le plus gros de la débâcle eut lieu *en moins d'un siècle*, suite à une série de cataclysmes en chaîne (l'un alimentant le suivant). Le niveau de la mer augmenta alors de près de 20 mètres en quelques années seulement, ce qui est fantastique. Ce très remarquable exemple peut être médité et transposé à l'époque future, si le glacier antarctique subit un sort analogue. Près de 20 mètres en quelques années, on voit d'ici le résultat : toutes les villes côtières disparaissent sous les flots !

Une géographie sans cesse remaniée

Après ce paroxysme étonnant par sa rapidité et son intensité jamais revue, la montée des eaux se ralentit. Le seuil -68 mètres (appelé seuil des Dardanelles et qui séparait le lac de Marmara et la mer Égée) fut atteint en -11700. C'est alors que cette mer trouva provisoirement un exutoire naturel

vers le nord-est, mais elle se trouva ensuite bloquée au seuil du Bosphore infranchissable avec son altitude de -38 mètres. L'ancien lac de Marmara doubla alors de surface, devenant une mer salée entourée de rives dévastées.

Il se produisit alors une très longue période de stabilisation autour du niveau -55 mètres qui dura près de 3000 ans (entre -11000 et -8000). Ce seuil est très identifiable sur tous les talus continentaux et il est même considéré comme un repère clé par les océanographes. Cette période d'accalmie, venant après plusieurs millénaires de tracasseries et d'insécurité permanente, fut mise à profit par les populations pour se fixer et se sédentariser puisque la superficie de leurs terres n'était plus constamment remise en cause par des modifications géographiques.

Il ne faut pas perdre de vue que la géographie avait été très sérieusement chamboulée, avec en particulier, en Méditerranée, l'ouverture de nouveaux passages maritimes importants (cruciaux mêmes pour les déplacements), notamment le détroit de Messine (entre l'Italie et la Sicile avec la formation des fameux Charybde, le tourbillon, et Scylla, le rocher) et les Bouches de Bonifacio (entre la Corse et la Sardaigne jusque-là soudées).

Avec la fin de la stabilisation à -55 mètres se termina le *Tardiglaciaire*, c'est-à-dire la deuxième grande phase de la déglaciation, qui a vu parallèlement l'éclosion de la civilisation magdalénienne et l'essor du Mésolithique. Ce fut l'entrée dans le Postglaciaire ou Holocène.

A partir de -8000, la mer recommença à monter lentement sur la Terre entière, et donc partout les transgressions marines entraînèrent des conséquences catastrophiques, notamment au niveau des dunes côtières qui furent souvent désintégrées. Cela tint en partie à une substantielle augmentation de la température (plus 4 degrés en une dizaine de siècles) qui contribua à faire fondre, en plusieurs étapes, le grand glacier rescapé du maximum glaciaire qui occupait encore la Scandinavie et la Baltique. Cette fonte allait entraîner plus tard, en -6700, une véritable débâcle qui elle-même allait être la cause du seul déluge de très grande envergure dont on a gardé la trace.

Comme l'expliquent André et Denise Capart :

" Nous ne pouvons pas ignorer l'histoire de la mer Baltique, car c'est sous ces lointains horizons que s'élabore le déséquilibre des masses glaciaires qui provoquera le seul déluge de la préhistoire dont les hommes ont gardé et transmis le récit circonstancié. Nous pensons, bien entendu, au déluge de Noé. " (7)

Dès -7300, les océans atteignirent le fameuse cote de -38 mètres, celle du seuil du Bosphore. Cela signifie qu'à partir de cette époque, *600 ans avant le Déluge*, la mer Egée, qui avait déjà envahi le lac de Marmara à partir de -11700, commença d'envahir progressivement *le lac d'eau douce de la mer Noire*, la salinisant petit à petit. Partout ce fut la débâcle, notamment dans la

Manche dans laquelle l'Atlantique se fraya un passage de plus en plus large et sépara définitivement la France et l'Angleterre, jusque-là riverains d'un grand fleuve Seine qui se jetait alors dans l'Atlantique.

La bipartition de -6700

C'est la période de la plus grande catastrophe terrestre recensée depuis 10 000 ans, loin devant les catastrophes cosmiques dont je parlerai au chapitre suivant. C'est celle que les glaciologues appellent la "bipartition" associée à la grande débâcle du glacier scandinave. Pour la première fois depuis longtemps, les eaux froides de la mer du Nord rejoignent les eaux salées de l'Atlantique au large des Pays-Bas, pays entre tous menacé par l'océan, suite à un gigantesque raz-de-marée parti des côtes de Norvège. Celui-ci est associé à la débâcle de la partie occidentale du glacier scandinave, qui représentait le quart de la masse totale et dont on a estimé le volume à 200 000 km³. C'est un nouveau passage ouvert d'une façon irréversible qui change tout l'environnement géographique, mais aussi culturel de la région.

Signalons en passant un fait géophysique et historique très mal connu jusqu'à maintenant : l'ouverture du passage Manche/mer du Nord est *contemporaine* du Déluge de Noé, qui a eu lieu à l'autre extrémité de l'Europe. Les deux sont datés de -6700.

Plus à l'est, c'est la grandiose catastrophe dont je vais parler en détail dans la section suivante : l'eau du glacier scandinave après avoir traversé une bonne partie de l'Europe, en suivant le cours des grands fleuves (le Dniepr principalement et dans une moindre mesure la Volga et le Don), et envahi la mer Noire ouverte au sud depuis peu, va se déverser pendant une année au moins dans la mer Egée qui s'en trouvera bouleversée. Il faut savoir que le Bosphore a servi plusieurs fois de moyen de communication aquatique, d'exutoire, entre la mer Noire et celle de Marmara au cours du Quaternaire, au gré des glaciations et des déglaciations. On peut dire que le chemin était déjà tout tracé ! L'épisode de -6700 avait déjà eu plusieurs précédents, mais alors les hommes n'étaient pas encore là pour en attester.

Le Déluge revisité par les glaciologues et les hydrologues

Dans leur livre, André et Denise Capart, sûrs de leurs preuves et de leurs arguments que certains qualifieront de révolutionnaires, et qui racontent très en détail ce cataclysme, énigme millénaire pour les humains qui ne se contentent pas de la pseudo-vérité biblique, précisent :

" Nous allons devoir entraîner le lecteur loin de l'horizon traditionnel des pays bibliques pour qu'il puisse réaliser à quel point les différentes phases du déluge de Noé n'ont pu se dérouler que sur les bords de la mer Noire, à l'exclusion de tout

autre point du globe. Le récit de la Genèse sera alors non seulement situé dans le temps et dans l'espace de manière irrécusable, mais chacun des épisodes deviendra plus crédible à la lumière des nouvelles découvertes de la science. " (8)

Il faut constater que cette hypothèse colle admirablement avec les données scientifiques et qu'il revenait à des glaciologues et des hydrologues de résoudre ce mystère plusieurs fois millénaire : " *Le Déluge a-t-il vraiment eu lieu ? et si oui, quand ?* " Nous allons voir maintenant le déroulement des différentes phases du cataclysme et ses répercussions humaines, qui ont été si importantes que, 8700 ans plus tard, des scientifiques s'en font encore l'écho.

Un glacier scandinave de plus en plus instable

Le Déluge ne fut qu'un épisode très spectaculaire d'un processus physique beaucoup plus global et qui démarra bien avant --6700. Depuis plus de 1000 ans, le glacier scandinave, dernier rescapé de la période glaciaire, se désagrègeait progressivement en liaison avec le réchauffement de la température. La base même du gigantesque glacier se réchauffait, ce qui permit la formation de poches d'eau de plus en plus nombreuses et volumineuses au contact du substrat rocheux qui servait d'assise et de point de fixation.

De telles poches d'eau, tous les glaciologues le savent (9), sont les prémices de catastrophes de grande envergure (10). A plus forte raison pour le glacier scandinave dont le volume se mesurait encore à près de 800 000 km³, soit le cinquième de sa masse initiale. Sa fragilisation de plus en plus accélérée par l'augmentation de la température, et plus encore par la chaleur géothermique qui agissait par le dessous, "décollant" littéralement le plancher du glacier, ne pouvait durer éternellement. Cette fragilisation déboucha d'abord sur la partition en deux "petits" glaciers autonomes, encore accrochés pour une ultime survie à leur substrat rocheux. C'est ce que les glaciologues ont appelé la "*bipartition*" du glacier fenno-scandien. Puis arriva inexorablement le moment du point de rupture.

Dans leur livre *L'homme et les déluges*, qui retrace magnifiquement l'histoire de ce glacier géant, André et Denise Capart parlent de cet instant critique qui se passa dans le nord de l'Europe :

" Y eut-il des oreilles humaines pour percevoir le bruit de tonnerre de ce que les glaciologues ont appelé la "*bipartition*" ? Pour eux, tout s'est probablement passé dans les solitudes glacées d'un monde chaotique où s'affrontaient les forces aveugles d'une nature inhumaine. De toute façon, personne n'a dû survivre au cataclysme pour le décrire, ce qui n'empêche pas les savants de dater à un ou deux siècles près l'ultime destruction de ce qui fut la calotte glaciaire fenno-scandienne : aux alentours de l'an 6700. " (11)

La débâcle de -6700

Les glaciologues qui ont étudié très en détail ce phénomène exceptionnel pensent que près d'un quart (200 000 km³) resta accroché sur les monts scandinaves, et qu'un autre quart déboula vers l'ouest et atteignit les côtes de la mer du Nord, ouvrant le passage avec la Manche. La moitié environ de ce glacier moribond (400 000 km³) s'effondra vers l'est dans le *lac Baltique* (alors fermé à l'ouest), charriant, outre la glace et l'eau qui le composait, une quantité de roches décrochées du substrat sous-jacent, provoquant dans un premier temps un raz-de-marée comme la Terre n'en a pas connu depuis, haut de plusieurs centaines de mètres.

Dans un deuxième temps, l'onde de choc submergea les pays Baltes, inversant sans problème le cours des rivières qui coulaient ordinairement vers le nord. Le mur d'eau était désormais inarrêtable et son parcours a pu être déterminé avec précision. Ce furent d'abord les barrières de Minsk (en Belarus actuel) qui furent détruites et franchies, puis les marais du Pripiet (à la frontière Belarus et Ukraine) et de la Bérésina (plus au nord en Belarus), deux affluents du Dniepr, le grand fleuve qui arrose l'Europe de l'Est du nord au sud. Ces marais, vestiges du cataclysme, n'ont jamais pu être totalement asséchés depuis.

Le mur d'eau qui représentait encore un cinquième de la masse initiale (soit 80 000 km³) s'engouffra ensuite dans la vallée même du Dniepr sur un front de près de 10 km, identifié avec le lit majeur du fleuve encore facilement repérable aujourd'hui, débouchant sur la mer Noire après avoir éliminé tous les obstacles sur son passage à travers les plaines de l'Ukraine.

La mer Noire et l'histoire de Noé

Le niveau de la mer Noire, qui était inférieur de 60 mètres au niveau actuel, monta alors à une vitesse vertigineuse au contact avec le mur d'eau qui alla se heurter aux monts de Cappadoce (aujourd'hui en Turquie) et d'Arménie, se frayant quelques passages entre les montagnes, repoussant l'eau des cours d'eau vers leur source.

C'est à ce moment précis que André et Denise Capart placent l'histoire de Noé et de son arche, histoire qui pourrait être, d'après eux, plus ou moins véridique. Poussée par le mur d'eau, à partir de la mer Noire, l'embarcation du patriarche aurait bel et bien pu se retrouver en haut d'une montagne de Turquie et d'Arménie. L'histoire du mont Ararat, qui a traversé les millénaires sans jamais trop convaincre (à part les fondamentalistes, pour qui la Bible doit se lire au premier degré) ne leur paraît pas invraisemblable. Bien sûr la légende a embelli l'histoire, mais Noé (ou un autre) pourrait être un *rescapé* du cataclysme de la mer Noire, lui même consécutif de la débâcle du glacier scandinave.

C'est la première fois que la légende biblique trouve sa place dans une version scientifique *d'un* déluge. L'histoire pourrait donc remonter en fait à -6700, à une période beaucoup plus ancienne que les -4000 du déluge de Sumer et *a fortiori* que les -2348 de la Genèse. Ce n'est pas surprenant en fait. Tout montre que le mythe écrase le temps et certains événements de l'histoire ancienne devront être nettement reculés dans le temps. Croire que toutes les dates actuellement retenues sont définitives relève de l'utopie.

La tradition orale a permis le transfert de l'histoire d'un rescapé du Déluge d'une civilisation à une autre dans tout le Bassin méditerranéen et dans tout le Proche et le Moyen Orient. C'est donc au fil des siècles que certaines variantes, adaptées au milieu local et à la mythologie régionale, auraient pu voir le jour et supplanter l'histoire originale.

Terminus : mer Égée

Mais l'histoire du raz-de-marée *d'origine glaciaire* ne s'arrête pas à la mer Noire et à Noé (dont l'épopée ne fut qu'un épiphénomène tout à fait marginal), et nous allons voir la fin du périple pour ces kilomètres cubes d'eau douce qui ont fait le voyage Scandinavie - mer Égée en quelques jours ou quelques semaines.

Par contre, la totalité du flot en provenance du nord mit probablement plus d'une année à s'écouler totalement, laissant sur leur passage des régions totalement dévastées, des populations anéanties et à plus long terme une géographie transformée. Ainsi on pense que la superficie de la mer Noire (qui est aujourd'hui de 420 000 km²) a pu augmenter d'un tiers et son niveau de 60 mètres en quelques mois seulement.

Très rapidement le seuil d'Istamboul fut atteint et la mer de Marmara fut inondée à son tour. Il faut savoir que le Dniepr à l'époque de la débâcle glaciaire déversait près de 80 km³ d'eau par jour, ce qui est considérable, alors que le détroit du Bosphore n'en laissait passer que 30 km³. Donc, bien que le Bosphore ait servi de déversoir naturel, la mer Noire continua de monter, inondant sans cesse des côtes autrefois à sec. Quand elle atteignit la cote +80 mètres, par rapport à son ancien niveau, l'eau put s'écouler par un deuxième exutoire vers le sud : la vallée de Sakariah située à 100 km à l'est du Bosphore, avant de rejoindre le golfe d'Izmit, extension est de la mer de Marmara. Ainsi celle-ci subit à son tour un sort analogue à la mer Noire, voyant sans cesse son niveau monter.

Laissons la conclusion à André et Denise Capart :

" Il faudra des mois, voire des années, pour que l'eau douce ainsi stockée se déverse dans la Méditerranée et établisse le fragile équilibre de leurs niveaux respectifs. Mer Noire et mer Egée sont enfin reliées par deux détroits qui dressent une barrière symbolique mais définitive entre l'Asie Mineure et le monde balkanique. " (12)

Une géographie nouvelle issue du Déluge

La géographie de la mer Égée a été transformée très rapidement, phénomène si étonnant pour les Anciens que plusieurs textes de l'Antiquité le relate, rapportés par Hérodote (484-420) et Diodore de Sicile (90-20) qui vécut à l'époque des derniers soubresauts de ces changements du niveau de la mer.

Relisons ce texte important de Diodore, concernant les habitants de Samothrace, une île grecque du nord de la mer Egée dont la surface aujourd'hui est de 180 km², mais qui était beaucoup plus grande il y a quelques milliers d'années.

" Les Samothraces racontent qu'avant les déluges qui ont frappé les autres nations, il y en avait eu, chez eux, un très grand par la rupture de la terre qui environne les Cyanées et, par suite, de celle qui forme l'Hellespont. Le Pont-Euxin, c'est-à-dire la mer Noire, n'était alors qu'un lac tellement grossi par les eaux des fleuves qui s'y jettent qu'il déborda, versa ses eaux dans l'Hellespont et inonda une grande partie de l'Asie. Une vaste plaine de la Samothrace fut convertie en mer. C'est pourquoi, longtemps après, quelques pêcheurs ramenèrent dans leurs filets des chapiteaux de colonnes de pierre, comme s'il y avait eu là des villes submergées. Le reste des habitants se réfugia sur les lieux les plus élevés de l'île. Mais la mer continuant à s'accroître, les insulaires invoquèrent les dieux et sauvés du péril, ils marquèrent tout autour de l'île les limites de l'inondation et y dressèrent des autels où ils offrent encore de nos jours des sacrifices. Il est donc évident que Samothrace a été habitée avant le Déluge. " (13)

On voit à travers ce texte, récit des conséquences *locales* d'un cataclysme vieux de plusieurs milliers d'années, combien les effets du Déluge avaient alarmé les habitants de l'époque. Ils durent supplier les dieux pour être sauvés de la destruction totale. Quand tout allait mal pour eux, les Anciens invoquaient les dieux, seuls susceptibles d'intervenir efficacement.

Diodore ne contestait pas l'authenticité du Déluge (le *vrai* et pas ses ersatz qui furent multiples durant les millénaires suivants), ni son ancienneté, car il était persuadé que ce grand cataclysme avait marqué la fin d'un des âges du monde dans un passé déjà conséquent. Il ne faut pas oublier que plusieurs philosophes penchaient pour un Univers vieux de plus de 10 000 ans, période durant laquelle le Déluge trouve sa place sans problème. Pour en revenir au texte cité plus haut, il faut aussi noter son commentaire très intéressant sur les îles Cyanées. Leur isolement remontait au cataclysme de -6700, car auparavant, au niveau -38 mètres dans la mer de Marmara, elles faisaient partie intégrante de l'Asie Mineure.

Hérodote, quatre siècles plus tôt, parlait des îles Cyanées comme des "îles flottantes" ou "îles noyées" car comme elles étaient très basses sur l'eau,

elles furent tour à tour apparentes ou submergées au fil des siècles selon la fluctuation quasi continue du niveau de la mer de Marmara.

On sait que la mer Égée fut particulièrement tributaire du niveau des eaux marines, leur montée isolant certaines îles et réduisant la superficie d'autres, surtout sur la côte asiatique. Chaque cartographie de la région était obligée de prendre en compte les nouvelles transformations.

Une multitude de déluges locaux partout dans le monde

J'ai insisté sur le Déluge de Noé, version *glaciologues* (beaucoup plus crédible que les diverses versions *mythologiques*), car il nous montre quelques conséquences géographiques et humaines d'une déglaciation importante et de sa phase ultime : la débâcle. Cette débâcle a eu lieu bien souvent sous d'autres cieux que la Scandinavie. De très nombreuses observations ont montré que l'Amérique du Nord a particulièrement souffert de la dernière grande glaciation et aussi de la déglaciation qui a suivi. Souvent des débâcles ont découlé sur des *cataclysmes en chaîne* : raz-de-marée, destructions de cordons littoraux, inondations, décimations de populations humaines et animales, géographie transformée.

Plusieurs livres (14) ont été consacrés aux divers déluges recensés dans les mythologies du monde entier, et il est indéniable que tous les continents ont été confrontés à des cataclysmes dont *l'eau* était la principale responsable. Les récits concernant ces déluges sont extrêmement variés, et parfois poétiques car souvent le mythe "en rajoute" au cataclysme lui-même.

On les regroupe en cinq grandes familles : l'eau des glaciers, l'eau du ciel, l'eau des fleuves, l'eau de la mer et les raz-de-marée. Je vais dire quelques mots des quatre familles dont je n'ai pas encore parlé.

– *l'eau du ciel*. A priori, le déluge *vient du ciel* : pluies exceptionnelles durant plusieurs jours ou plusieurs semaines, liées parfois à la mousson ou à des orages tropicaux. Des contrées entières peuvent être dévastées. Mais il ne faut pas perdre de vue que dans certaines régions il s'agit d'un acte naturel *positif*, notamment en Inde où la mousson est assimilée à un *renouveau*. Le déluge est à la fois force de destruction et de création. L'un des fondements de la philosophie bouddhiste est celui-ci : " *De la vie naît la mort, de la mort naît la vie* ". Le déluge biblique, d'après les textes eux-mêmes, est de cette nature : il a plu pendant quarante jours et quarante nuits et cette pluie diluvienne a tout inondé, tout détruit.

– *l'eau des fleuves*. Tout le monde a en mémoire le souvenir de crues catastrophiques. Ces crues devaient être encore bien pires à l'époque où les cours de grands fleuves n'étaient pas canalisés, notamment en Chine, où au fil des siècles des millions de personnes moururent victimes d'inondations phénoménales qui noyèrent des régions entières. Le déluge de Sumer et son ersatz babylonien seraient de cette nature, liés à une inondation

catastrophique de l'Euphrate vers -4000 d'après l'étude des alluvions remontant à cette époque.

– *l'eau de la mer*. Je parle ici des inondations dues à la rupture de barrages naturels comme celles qui ont dévasté à plusieurs reprises des pays côtiers, comme les Pays-Bas, qui sont à fleur d'eau. Des tempêtes, associées à des grandes marées et à une mer déchaînée, ont entraîné maintes fois la rupture de cordons littoraux, parfois impressionnants mais extraordinairement fragiles s'ils ne sont pas suffisamment stabilisés. En quelques jours seulement, la mer a pu gagner définitivement plusieurs milliers de kilomètres carrés sur des terres auparavant émergées. Ce genre de cataclysme a dû être très fréquent durant la longue période (plusieurs milliers d'années) de la montée des eaux océaniques qui se trouvaient forcément de temps à autre en présence de nouveaux obstacles, obstacles provisoires qu'elles "avaient" quand le point de rupture était atteint.

– *les raz-de-marée*. Ils sont parfois liés à des éruptions volcaniques, mais surtout à des séismes dans les régions côtières, frontières de plaques tectoniques (15). Les vagues ainsi créées peuvent dépasser couramment la dizaine de mètres (parfois même beaucoup plus) et avoir une force prodigieuse (16). Dans cette catégorie de "déluges", on place surtout le *déluge de Deucalion* qui date de vers -1600 et que l'on associe au raz-de-marée "grec" consécutif à l'explosion du Santorin. Il est bien sûr également lié au fantastique raz-de-marée, haut de près de 200 mètres, ce qui reste exceptionnel, et qui balaya la côte nord de la Crète comme nous allons le voir plus loin dans la section consacrée à Santorin.

Sodome et Gomorrhe : un cataclysme sismique

J'ai déjà évoqué ce cataclysme au chapitre 2, du fait de sa présence dans le texte biblique (17). On sait donc qu'il fut contemporain du patriarche Abraham, que l'on situe en général au XIX^e siècle avant J.-C. Originnaire d'Ur, cité antique de la basse Mésopotamie. C'est lui qui s'installa en Palestine avec sa tribu. Comme le raconte *la Bible* : " *Yahvé fit pleuvoir sur Sodome et sur Gomorrhe du soufre et du feu venant du ciel* ". Pour les rédacteurs de la *Genèse*, il s'agissait d'une vengeance de Dieu. Pour les géologues, bien sûr, il en va tout autrement.

Dans son livre *La Bible arrachée aux sables* (18), l'historien allemand Werner Keller (1909-1980) explique d'une manière précise le cataclysme. L'engloutissement de la vallée de Siddim avec ses quatre villes martyres (Sodome, Gomorrhe, Adma et Seboïm) ensevelies dans le bitume serait dû principalement à un grand tremblement de terre. Celui-ci aurait débouché d'abord sur un affaissement de terrain, qui lui-même aurait libéré des forces volcaniques tout au long de la crevasse ainsi formée, avec comme conséquences d'importantes explosions et des dégagements de gaz naturel, dans ce qui est aujourd'hui la partie méridionale de la mer Morte, qui n'est profonde que d'une quinzaine de mètres et qui n'existait pas il y a 4000 ans.

Ce cataclysme naturel qui se produisit dans une région déjà peuplée à l'époque, et qui anéantit au moins quatre villes, marqua fortement les esprits par sa soudaineté et son ampleur, comme le raconte *la Bible*. Les premiers compilateurs des textes bibliques récupérèrent sans complexes le cataclysme pour en faire un acte de la justice divine destiné à punir des populations corrompues et licencieuses et surtout pour servir d'exemple pour les autres qui voudraient s'engager sur une mauvaise pente.

Si les géologues croient, probablement avec raison, à un événement d'abord sismique, puis volcanique, il s'est pourtant trouvé un astronome compétent comme Ernst Opik (1893-1985) (19) pour conclure à un impact cosmique. Ce savant, l'un des premiers ouvertement catastrophiste, était à la recherche de cataclysmes répertoriés pouvant être liés à des impacts de comètes et d'astéroïdes comme ceux que j'étudierai au prochain chapitre, et celui de la mer Morte lui paraissait comme une éventualité qu'il conviendrait d'étudier plus en détail. Apparemment, concernant cet exemple précis, il s'est trompé, mais un petit doute subsiste quand même, qui tient principalement au texte lui-même. En effet, celui-ci parle bien d'un déluge de soufre et de feu *venant du ciel* et non pas de la terre.

L'éruption du Santorin et ses conséquences

Le cataclysme volcanique du Santorin est l'une des deux grandes catastrophes *physiques* qui se sont produites au cours du II^e millénaire avant notre ère dans le Bassin Méditerranéen. Il a eu des conséquences extraordinaires et mérite un exposé détaillé pour bien faire comprendre que le cataclysme, quel qu'il soit, peut avoir des prolongements inimaginables sur la vie des humains et peut conditionner leur avenir, en détruisant des civilisations prospères et en contribuant à la refonte des sociétés humaines. Santorin, on le sait, aujourd'hui, c'est le quasi-anéantissement de la civilisation minoenne, alors au zénith de sa puissance. Trois ou quatre siècles plus tard, la comète Sekhmet sera le coup de grâce définitif pour une civilisation en sursis, incapable de se relever totalement et de retrouver sa gloire passée.

Le cataclysme, s'il est force de création au niveau de l'espèce est aussi, et surtout, une vraie *force de destruction* au niveau des peuples et des civilisations. Et cette vérité était encore plus vraie dans le passé, quand les peuples meurtris ne pouvaient compter que sur eux-mêmes, et non, comme aujourd'hui, sur une solidarité internationale capable d'atténuer quelque peu le traumatisme subi.

La redécouverte de la Crète minoenne

C'est dans les premières années du XX^e siècle que l'archéologue anglais Arthur Evans (1851-1941) redécouvrit la civilisation de l'âge du bronze de la Crète. Il lui donna le nom de *minoenne*, d'après Minos le roi légendaire, héros de nombreux récits mythologiques. En 1900, Evans mit à jour le fameux palais de Cnossos au nord de la Crète. D'autres fouilles dans toute l'île

permirent par la suite de sortir également de l'oubli plusieurs autres sites de première importance, comme ceux de Phaistos, Haghia Triada, Mallia et Zacros. Partout, des vestiges de palais montrèrent l'existence d'une très brillante civilisation que l'on a daté du second millénaire avant J.-C. Étonnamment, d'après les spécialistes, cette civilisation s'était pratiquement effondrée d'un seul coup aux alentours de -1600/-1500, et après un ultime soubresaut s'était positivement désintégrée vers -1200.

En 1909, un autre archéologue britannique, Kingdon Frost (1877-1914), publia un article intitulé *Le continent perdu*, dans lequel il suggérait pour la première fois que la légende de l'Atlantide était probablement liée à la destruction de la civilisation crétoise nouvellement mise à jour. Frost nota que, tout comme dans le texte de Platon, Cnossos et ses villes alliées furent détruites alors qu'elles se trouvaient au sommet de leur puissance. Aucun déclin ne put être mis en relief, mais au contraire une destruction quasi instantanée, due presque obligatoirement à un cataclysme.

" Ce fut comme si le royaume tout entier avait été englouti sous les flots, comme si l'histoire de l'Atlantide était vraie. "

Cette lumineuse idée de l'archéologue britannique, associant Crète et Atlantide (20), passa pourtant pratiquement inaperçue, ne soulevant apparemment aucun écho dans les milieux spécialisés. Comme c'est souvent le cas, cette découverte essentielle était trop en avance sur son temps.

Ce n'est qu'en 1932 que le débat allait rebondir. L'archéologue grec Spiridon Marinatos (1901-1974), en fouillant le site d'Amisos, l'ancien port de Cnossos, découvrit parmi d'autres vestiges une fosse remplie de pierres ponces. Il se posa immédiatement la question : " *D'où cette roche, d'origine volcanique, pouvait-elle provenir ?* ". Une seule hypothèse lui parut plausible : la côte nord de la Crète avait été balayée par un tsunami véhiculant ces pierres ponces et certaines étaient restées piégées sur place. Ce raz de marée venant du nord devait être responsable de la destruction des palais crétois, et même de toute la civilisation minoenne dans son ensemble (21).

Cette remarquable découverte en Crète, suivie de l'intuition tout aussi géniale de Marinatos, fut le point de départ de la fameuse hypothèse sur l'Atlantide qu'il publia en 1939 dans la revue anglaise *Antiquity*, dans un article intitulé " *La destruction volcanique de la Crète minoenne* ".

L'histoire d'une île volcanique : Santorin

L'archipel de Santorin se situe au sud de la mer Egée, entre la Grèce et la Crète, et fait partie des Cyclades. Il comporte cinq îles d'une superficie totale de 75 kilomètres carrés. On distingue, en gros, deux grandes unités géomorphologiques. Les trois îles périphériques : Théra, de loin la plus importante, Thérasia et Aspronisi sont les restes d'un ancien volcan qui s'est effondré pour former une grande caldéra de 11 x 7,5 km envahie par la mer.

Au centre de cette caldeira, se trouvent les deux autres îles qui sont postérieures à la catastrophe : Nea Kameni et Palea Kameni.

Dans les années 1950, une très importante découverte scientifique : la possibilité de datation par le carbone 14 permit de situer dans le passé, avec une précision remarquable, divers éléments contemporains ou liés directement à la fameuse explosion du Santorin, que l'on savait avoir été l'un des événements volcaniques majeurs de la haute Antiquité. Les résultats indiquèrent la période -1600/-1500 comme étant celle de la catastrophe qui décapita l'île ancienne unique, connue sous le nom de *Stronghile*, la ronde.

En fait, on savait depuis 1860 que l'archipel de Santorin abritait des trésors archéologiques (datés par la suite de 3500/3600 ans), car à l'époque d'importants éboulements dus à l'exploitation intensive des carrières de pierres ponce sur Thérasia avaient mis à jour les ruines de plusieurs habitations ensevelies auparavant sous plus de trente mètres d'éjections volcaniques. L'ampleur d'une telle éruption phénoménale et les dégâts catastrophiques qu'elle avait engendrés, principalement la destruction d'une civilisation de l'âge du bronze, avaient très intrigué le minéralogiste et volcanologue français Ferdinand Fouqué (1828-1904) (22) qui avait visité le site en 1867, mais l'intérêt de la découverte n'avait pas paru évident aux savants de l'époque, et Santorin était retombé dans un oubli inadmissible.

En fait, les savants de l'époque avaient peur des catastrophes. Ils craignaient plus que tout de découvrir des vestiges de cataclysmes récents et de devoir reconsidérer la validité des hypothèses catastrophistes, à une époque où l'uniformitarisme semblait s'être définitivement imposé.

Il fallut donc attendre la fin des années 1930 pour que Marinatos fasse le rapprochement entre le déclin, la quasi-disparition même, de la civilisation minoenne et l'éruption paroxysmale du Santorin. Toutes les découvertes ultérieures allaient lui donner raison. En particulier, en 1967, des fouilles effectuées à Akrotiri, petit village au sud de l'île principale Théra, permirent de mettre à jour une ville résidentielle, cachée jusqu'alors sous dix mètres de pierres ponce. On découvrit des centaines de poteries de l'époque minoenne et toutes sortes d'ustensiles de la vie courante. Par contre, aucun squelette humain ne fut dégagé, ce qui prouve que les signes précurseurs de l'éruption avaient été suffisamment étalés dans le temps, et surtout suffisamment impressionnants, pour que la population quitte l'île avant le déchaînement final du Santorin.

Les diverses découvertes archéologiques concernant la région et l'étude de la stratigraphie des différents produits éjectés par le volcan lors de la grande éruption de -1500 (plutôt -1600 pour les volcanologues actuels), notamment leur distribution dans les fonds marins de la Méditerranée orientale, ont permis aux volcanologues et aux historiens de reconstituer les grandes étapes de l'effondrement de la civilisation minoenne qui a régné sur toute la Méditerranée entre -2000 et -1500. Jusqu'à cette époque, Santorin était une île unique d'environ 12 km de diamètre et dont le sommet volcanique pouvait

atteindre 1000 mètres. Sur ses flans, plusieurs villages minoens avaient été bâtis et étaient habités en permanence. Car l'empire minoen, empire essentiellement maritime, comme on l'a largement démontré, s'appuyait principalement sur la Crète, l'île majeure, mais aussi sur plusieurs îles des Cyclades, parmi lesquelles, en premier lieu, Santorin qui fut croit-on *l'île sacrée* de la civilisation minoenne, du fait de sa beauté, et surtout de son énorme sommet volcanique qui culminait haut dans le ciel, tout près des dieux, et qui devait être visible loin en mer.

L'empire minoen était alors à son apogée, mais il n'allait plus tarder à sombrer en pleine gloire. Une première alerte eut lieu à Santorin quelques années avant le cataclysme final. Une succession de séismes, probablement en rapport avec le remplissage par la lave du cône volcanique, obligea les habitants de l'île à fuir vers des sites plus sûrs. On a noté en fouillant Akrotiri que des murs lézardés, des plafonds effondrés, des colonnes abattues étaient antérieures à l'éruption elle-même et ne pouvaient dater que de ces secousses sismiques qui précédèrent le cataclysme final d'une dizaine d'années environ, peut-être moins.

Les tremblements de terre s'étant provisoirement calmés, les habitants de Santorin revinrent sur leur île, mais pas pour très longtemps. Ils n'eurent pas le temps de réparer toutes les maisons endommagées avant le réveil du volcan qui s'effectua progressivement. On a noté plusieurs couches successives de cendres d'une épaisseur totale de 1,50 mètre environ. Les habitants quittèrent alors définitivement Santorin, c'est pourquoi on n'a retrouvé aucun squelette humain sur l'île. Elle était déjà désertée quand la conflagration finale eut lieu.

L'explosion de l'île des dieux

C'est autour de -1600 (23) que le volcan explosa littéralement. Une fantastique éruption, l'une des plus extraordinaires que l'homme ait connue, allait balayer en quelques jours, et à tout jamais (malgré quelques petits sursauts désespérés) une civilisation quasiment millénaire (24/25). Plus de 60 mètres d'épaisseur de pierres ponces recouvrirent Santorin. Le vent dominant nord-ouest/sud-est porta quantité de cendres jusqu'en Egypte. La Crète qui se trouve à environ 110 km au sud de Santorin vit toute sa partie centrale et orientale recouverte de 10 centimètres environ de ces cendres, alors qu'étonnamment la partie occidentale fut plus ou moins épargnée.

Le bruit de l'éruption dut être phénoménal, puisqu'on prétend qu'il fut audible jusqu'en Egypte, et l'obscurité fut totale durant plusieurs jours en Crète et partielle en Egypte durant une bonne semaine. Le magma ayant totalement abandonné le cône volcanique (60 km³ de matériaux furent envoyés dans l'atmosphère, quatre fois plus que pour le Krakatoa en 1883), le fier volcan s'effondra sur lui-même pour former la caldéra très spectaculaire que l'on connaît encore de nos jours et qui montre si bien l'envergure du cataclysme.

Un impressionnant *nuage mortel de cendres chaudes* se déplaça dans toute la partie est de la Méditerranée. On pense que la couche de cendres sur les îles voisines atteignit plus de cinq centimètres d'épaisseur, couche largement suffisante pour étouffer définitivement la végétation, les hommes et aussi quasiment tous les animaux et les insectes autochtones. Le nuage de poussières et de cendres se dispersa ensuite dans toute l'atmosphère terrestre, faisant partiellement obstacle au rayonnement solaire (26).

Des pluies acides associées complétèrent le désastre dans les jours et les semaines suivants. La quasi-totalité des récoltes furent détruites et les terres empoisonnées durant des années. L'écologie de la Crète fut perturbée pendant pratiquement un demi-siècle. La fragilisation de la civilisation minoenne fut enclenchée d'une manière irréversible tout de suite après le cataclysme, avec une crise économique terrible et déstabilisante.

Des forages océanographiques dans l'est de la Méditerranée ont permis de retrouver des traces du cataclysme, notamment à proximité des côtes de Turquie et de Chypre, sous la forme de dépôts de cendres à 60 centimètres de profondeur.

Ces forces prodigieuses, ce n'était pas seulement celles qui ont "cassé la montagne" et projeté dans l'atmosphère des kilomètres cubes de débris, c'était aussi celles du gigantesque raz de marée qui se forma, comme conséquence de l'effondrement du cône volcanique. Il s'agit là d'une répercussion géologique quasi instantanée bien connue. Ce raz de marée atteignit au moins 200 mètres de hauteur, puisque l'on a retrouvé à cette même altitude des pierres ponces sur les collines d'îlots avoisinant Santorin. Ce mur d'eau, d'une puissance inouïe, véhiculant des produits éjectés du volcan, balaya littéralement la côte nord de la Crète, détruisant tous les ports (dont Amnisos, où 3500 ans plus tard Marinatos retrouva des pierres ponces "piégées" dans une fosse). Le tsunami atteignit aussi les côtes de la Grèce, Rhodes et toute la côte orientale de la Méditerranée.

Qu'en est-il du Santorin aujourd'hui ? On connaît bien son histoire ultérieure (27). Après son coup de force de -1600, il resta totalement inactif pendant plus de 1000 ans. C'est vers 197 avant J.-C. que naquit dans la caldéra l'îlot volcanique baptisé Paléa Kaméni. L'autre îlot existant à l'heure actuelle, Nea Kaméni, est l'issue récente (de 1866 à 1870) de la fusion de deux petits îlots, nés l'un de 1570 à 1573 (Mikra Kaméni) et l'autre de 1707 à 1711 (Néa Kaméni primitif).

La datation du cataclysme du Santorin a été l'une des grandes nouveautés du XX^e siècle. Jusque-là la *compression du temps* avait totalement occulté les divers cataclysmes différents qui se sont succédé au fil des siècles. Ainsi l'*Apocalypse* de Saint Jean regroupe pêle-mêle des fléaux hétéroclites observés lors des drames humains associés aux cataclysmes de Sodome et Gomorrhe, de Santorin et de l'impact de la comète Sekhmet qui se sont étalés sur près de huit siècles.

La période post-catastrophe et les conséquences humaines

La conséquence principale du cataclysme, outre la désintégration du volcan, fut la destruction quasi complète de la Crète (28), centre principal de la civilisation minoenne. Le peuple minoen était surtout un peuple *maritime*, je l'ai dit. Il perdit la quasi-totalité de sa flotte à cause du tsunami meurtrier qui détruisit tous les ports de l'est méditerranéen. En même temps que la destruction d'une grande partie de la population, c'est la force vive de ce peuple, sa raison d'être, qui fut détruite en quelques jours. Quasiment la fin du monde pour cette civilisation presque millénaire, fleuron de l'âge du Bronze, qui régnait sans partage sur le Bassin méditerranéen, et même probablement bien au-delà, et partie pour perdurer au moins quelques siècles encore.

Un cataclysme grandiose comme celui du Santorin, l'île des dieux, devait inévitablement être la base de légendes qui allaient se transmettre au fil des siècles. On y associe notamment le déluge de Deucalion qui raconte la lutte féroce entre Zeus et Poséidon et certains épisodes de l'histoire des Argonautes. Certains auteurs associent également l'éruption du Santorin et les dix plaies d'Égypte, mais cette corrélation est plus que douteuse pour une question de dates. Santorin, c'est le XVI^e ou même XVII^e siècle d'après les volcanologues actuels, il ne faut jamais l'oublier. Les plaies d'Égypte, ce sont le XIII^e siècle, comme je l'expliquerai au chapitre suivant. Enfin, on sait maintenant que Platon s'est fortement inspiré de l'épisode du Santorin pour écrire son *Atlantide*, comme l'a bien montré Marinatos, 24 siècles plus tard.

Comme quoi un cataclysme de grande envergure peut entraver d'une manière radicale le cours normal des choses. Avec Santorin, et à une échelle "locale", on se trouve dans le même scénario que celui d'il y a 65 MA. Les dinosaures et la civilisation minoenne, alors au sommet de leur ascension, ont été balayés par un cataclysme et ont dû laisser leur place à d'autres. Conclusion : le cataclysme est un carrefour entre le passé et l'avenir. La *malchance* est bien un facteur qui a sa place non seulement dans l'évolution, comme l'ont montré Gould, Raup et quelques autres, mais aussi dans l'histoire des hommes. Dinosaures et Minois ne demandaient qu'à vivre !

Catastrophisme et atlantides

Plus que toute autre catastrophe remontant à l'Antiquité, celle liée à *l'Atlantide* est synonyme de désastre à la fois terrestre et humain, et les divers auteurs ayant traité du sujet depuis des siècles lui ont attribué des causes diverses, d'autres accreditant au contraire l'hypothèse d'une fable, inventée de toutes pièces par Platon.

L'historien de l'Atlantide Olivier Boura, dans son livre *Les Atlantides. Généalogie d'un mythe* (29), présente tous les principaux textes qui ont entretenu le mythe depuis l'Antiquité et sous-tendu des hypothèses variées quant à son possible emplacement. Une étude détaillée du texte de Platon a conduit cet auteur à la conclusion suivante :

" Il est clair qu'à travers l'histoire de l'Atlantide Platon mène le procès du matérialisme, des valeurs mêmes du matérialisme, en même temps, sans doute, qu'il interprète, à sa manière, les conflits qui au V^e siècle av. J.-C. opposèrent les cités grecques, petites, pauvres et vertueuses, aux empires orientaux. La victoire d'Athènes, ici, c'est la victoire même de la raison, de la mesure, de l'ordre, sur les forces immenses, nocturnes et abyssales, inhumaines, d'un monde barbare engendré par le chaos, et retourné au chaos. " (30)

Dès l'Antiquité, les plus grands philosophes postérieurs à Platon, à commencer par Aristote lui-même, ne croyaient pas à l'Atlantide, telle que prévue par Platon. Boura le confirme aujourd'hui, lui qui y voit un combat entre la raison, la mesure et l'ordre contre les forces de la barbarie. Déjà à l'époque de Platon, *la raison* avait bien du mal à s'imposer...

Avec l'Atlantide, le problème est que le pays disparu de Platon est devenu au fil des siècles le nom générique des cités et des îles disparues à la suite de cataclysmes divers. Donc, il n'y a rien d'anormal à ce que l'on trouve des *atlantides* partout, quand on sait que le niveau moyen des mers a augmenté de 110 mètres en 15 000 ans, sans parler des autres cataclysmes terrestres et cosmiques. Que de villes côtières noyées, que d'îles englouties, que de territoires submergés, qui tous ont abrité la vie, une vie aujourd'hui disparue.

Là encore je vais me limiter à quelques mots sur les hypothèses principales. De nombreux livres (31/32) traitent du sujet, globalement ou sélectivement, de nombreux auteurs privilégiant *leur* solution, qui n'est presque toujours qu'une solution parmi d'autres possibles.

– *les hypothèses atlantiques*. L'Atlantide a été considérée parfois comme une grande île située entre l'Europe et l'Amérique, dont les Açores et les Canaries seraient les vestiges. Certains auteurs ont préféré une assise continentale sur l'Atlantique, avec les hypothèses Tartessos, l'Atlantide marocaine ou africaine. Les cataclysmes sont des effondrements de la croûte terrestre, le volcanisme, l'engloutissement des terres, le raz-de-marée destructeur.

– *les hypothèses méditerranéennes*. Hormis l'hypothèse volcanique de Santorin, on a parlé de villages préhistoriques engloutis dans l'Adriatique (probablement situés sur les rives du Pô avant la montée des eaux dans l'Adriatique) et d'une Atlantide tunisienne dans ce qui est aujourd'hui le golfe de Gabès qui n'a été recouvert par les eaux que récemment à l'échelle géologique. Il s'agit de villages engloutis lors de la dernière montée générale des eaux qui pouvaient se situer à un niveau –20 ou –30 mètres par rapport au niveau actuel. L'ensablement et les alluvions ont eu tôt fait de faire disparaître des vestiges humains, qui ne sont pas détruits souvent, mais seulement *enfouis*, donc identifiables dans l'avenir.

– *les hypothèses américaines*. La plus célèbre est celle de Bimini (33) que l'on a souvent assimilée à la "vraie" Atlantide". Ce n'est qu'une atlantide parmi d'autres, noyée elle aussi par la montée des eaux. Il est sûr que l'archipel des Bahamas ne représente que les vestiges de terres beaucoup plus importantes. Certains chercheurs ont cru voir dans d'immenses pierres englouties les traces d'un "escalier" qui aurait été taillé par une civilisation disparue. Il n'y a rien là d'impossible, les Anciens savaient tailler la pierre et ils érigeaient des escaliers quand ils en avaient besoin. Seulement, là comme partout, il a fallu "reculer" quand le niveau de l'océan, grossi par les millions de kilomètres cubes des eaux de la déglaciation, est remonté lentement mais inexorablement. Ce fut la loi commune pour tous. On a aussi postulé pour une Atlantide brésilienne et de nombreuses légendes des peuples américains et amérindiens parlent de déluges et de cités englouties. Rien d'étonnant à tout cela : *l'atlantide*, comme *l'apocalypse*, est un canevas de cataclysme.

– *les hypothèses diverses*. L'Atlantide s'est diversifiée au fil des siècles et "décentralisée". Des vestiges de civilisations disparues ayant été repérées partout, des chercheurs ont proposé des sites comme la Suède, l'Allemagne du nord-ouest, la mer du Nord (34), ou même des sites orientaux. Rien à voir avec l'Atlantide de Platon, mais *atlantides* parmi d'autres. Une chose paraît évidente : partout, sur tous les continents, sur toutes les mers, des villes, des régions ont été détruites par des cataclysmes divers. Quand elles sont trop exotiques, les *atlantides* peuvent prendre un nom particulier : Pount, Mû, ..., noms haïs par les scientifiques mais qui peuvent cacher parfois des cataclysmes bien réels : îles englouties, régions côtières affaissées, ou régions continentales devenues désertiques. Peut-être au fil des prochains siècles, des sondages océanographiques et des études sur le terrain, pourra-t-on repérer quelques-uns de ces sites atlantidiens avec certitude.

Retour au monde cyclique des Anciens

Pour clore ce chapitre sur les grands cataclysmes terrestres (de notre zone culturelle, car on ignore presque tout des autres), il faut revenir sur le fameux *temps cyclique* des Anciens dont j'ai parlé au chapitre 1. Tous les philosophes de l'Antiquité étaient persuadés que *le monde*, et *l'humanité* avec elle, se renouvelaient à l'occasion de catastrophes dues alternativement au feu et à l'eau. Les quelques exemples cités dans ce chapitre concernent surtout *l'eau*, c'est-à-dire les cataclysmes d'origine terrestre (une petite partie concerne aussi les effets du volcanisme). Dans le chapitre suivant, je vais étudier en détail l'autre volet, celui concernant surtout *le feu*, c'est-à-dire principalement des cataclysmes d'origine cosmique.

Pour les Anciens, le temps était cyclique pour des raisons astrologiques. Ils attachaient beaucoup d'importance aux ères précessionnelles et étaient persuadés de leurs rapports avec des événements recensés ou supposés. Ces signes astrologiques qui leur étaient attachés ont traversé les millénaires pour arriver sans problème jusqu'à nous.

On ne peut s'empêcher d'admirer cette sagacité des Anciens pour rechercher les causes de ces *Grandes Années*, qui se terminaient en drames, liés à la violence de la nature, drames qui étaient tout autant humains, et dont ils ont été si souvent victimes. Ils ont tout fait aussi pour les dater, s'appuyant pour ce faire sur le mouvement des planètes, leur meilleur calendrier, les divisant même en *Grands Étés* et *Grands Hivers*. Dans *Le système du monde* (tome 1), Pierre Duhem rappelle ce texte de Olympiodore, érudit chrétien de la fin du VI^e siècle qui vivait à Alexandrie et lointain disciple d'Aristote, qui résume assez bien le problème :

" Que la mer se dessèche, que la terre ferme, à son tour, se transforme en mer, cela provient de ce que l'on nomme le Grand Été et le Grand Hiver. Le Grand Hiver a lieu lorsque tous les astres errants se réunissent en un signe hivernal du zodiaque, le Verseau ou les Poissons ; le Grand Été, au contraire se produit lorsqu'ils se réunissent tous en un signe estival comme le Lion ou le Cancer. De même, le Soleil, pris isolément, produit l'Été lorsqu'il vient dans le Lion et l'hiver lorsqu'il vient dans le Cancer... Lorsque après une très longue durée, tous les astres errants se trouvent en une même place, pourquoi donc cette conjonction produit-elle la Grande Année ? C'est que tous les astres errants, lorsqu'ils approchent du point culminant [de l'écliptique], échauffent comme le fait le Soleil ; ils refroidissent, au contraire, lorsqu'ils sont éloignés de ce point ; il n'est donc pas invraisemblable qu'ils produisent le Grand Été lorsqu'ils viennent tous au point culminant, et le Grand Hiver lorsqu'ils en sont tous éloignés. Donc, pendant le Grand Hiver, la terre se change en mer tandis que le contraire a lieu au cours du Grand Été. " (35)

Ce texte un peu alambiqué de Olympiodore explique l'essentiel : la mer peut se transformer en terre ferme, et inversement la terre ferme peut se transformer en mer. On peut dire que la variation du niveau des océans et des lacs découvre et inonde successivement certaines régions côtières et des îles dont l'altitude maximale ne dépasse pas quelques mètres.

Il ne faut jamais perdre de vue que, depuis la fin du dernier maximum glaciaire, les océans ont regagné 110 mètres en moyenne, ce qui n'est pas rien. Ce que les glaciologues appellent "*la débâcle atlantique*", datée d'environ -13500, est aussi appelée "*Déluge de Lascaux*". Nos ancêtres proches étaient quasi contemporains de la plus grande catastrophe mondiale arrivée sur la Terre depuis 20 000 ans. On sait par les innombrables traces qu'ils nous ont laissées que l'art était déjà bien présent (il suffit de visiter les merveilleuses grottes de Dordogne et d'ailleurs pour s'en convaincre) et qu'il était l'un de leurs moyens d'expression.

Ainsi ont été ensevelis (recouverts par la sédimentation et pas forcément détruits), parallèlement à la montée progressive des eaux, et pour très longtemps, des vestiges d'anciennes civilisations protohistoriques qui

vivaient au bord des océans, là où la vie était nettement plus facile, grâce à la pêche côtière qui assurait la survie de groupes humains relativement importants. Certaines n'étaient pas si primitives que l'on voudrait nous faire croire, même s'il est hors de question d'admettre qu'elles aient pu atteindre un niveau tel que celui de l'Antiquité classique. La découverte de mégalithes noyés n'est qu'un exemple.

Pour les astronomes aussi les glaciations sont cycliques, mais pour des raisons différentes bien sûr, liées principalement à la théorie astronomique des climats de Milankovic (36). Ce qui est tout à fait nouveau, du fait des activités humaines qui interfèrent *pour la première fois* d'une manière significative et qui participent à un réchauffement indéniable de la planète, c'est que le prochain maximum glaciaire ne se produira peut-être pas à la date normale, et qu'il devra attendre plusieurs dizaines de milliers d'années, si l'homme reste raisonnable et ne dépasse pas les "bornes" acceptables. On sait qu'il n'en prend pas vraiment le chemin.

L'homme est un prédateur nouveau et un peu inquiétant pour la planète. Mais bien que sa présence soit un facteur à prendre en compte, il est loin d'être le seul et surtout le plus important. L'homme ne fait pas le poids devant le cataclysme, qu'il soit naturel (terrestre ou cosmique) ou même humain (technologique ou écologique). La nature reprendra vite ses droits. Le rapport des forces n'est pas, et ne sera jamais, le même.

Notes

1. G. Rachet, *Dictionnaire de l'archéologie* (Robert Laffont, coll. Bouquins, 1983).
2. Université d'Oxford (sous la direction de M.C. Howatson), *Dictionnaire de l'Antiquité* (Robert Laffont, coll. Bouquins, 1993). Titre original : *The Oxford companion to classical Literature* (1989).
3. M. Déribéré et P. Déribéré, *Histoire mondiale du déluge* (Robert Laffont, 1978).
4. A. Capart et D. Capart, *L'homme et les déluges* (Hayez, 1986). Un livre essentiel pour comprendre la déglaciation et ses conséquences humaines
5. J. Labeyrie, *L'homme et le climat* (Denoël, 1985).
6. J.-C. Duplessy et P. Morel, *Gros temps sur la planète* (Odile Jacob, 1990).
7. A. Capart et D. Capart, *L'homme et les déluges*, op. cit., citation p. 212.
8. idem, citation p. 250.
9. C. Lorius, *Glaces de l'Antarctique* (Odile Jacob, OJ37, 1993).

10. L'exemple du glacier alpin qui s'est effondré le 12 juillet 1892 est bien connu. Une poche d'eau, estimée à 200 000 m³ creva la surface du glacier et entraîna sa *débâcle* en quelques minutes. La masse totale des divers résidus (glaces + terre + roches arrachées par le mouvement) atteignit un volume de 800 000 m³ (quatre fois supérieur à la poche d'eau initiale). Tout ce qui existait comme arbres et comme végétation sur le passage du glacier fut arraché et le sol fut totalement "nettoyé".
11. A. Capart et D. Capart, *L'homme et les déluges*, op. cit., citation pp. 259-260.
12. idem, citation p. 262.
13. Diodore de Sicile, *Bibliothèque historique*, V, 47. Diodore de Sicile (90-20), dans sa *Bibliothèque*, raconte l'histoire universelle des origines à son époque.
14. Pour en savoir plus sur les déluges, le lecteur peut se référer à *Histoire mondiale du déluge* de Maurice et Paulette Délibéré (voir référence 3).
15. A. Cisternas, L. Dorbath, B. Delouis et H. Philip, *La préparation d'un grand séisme*, Pour la Science, 242, pp. 42-48, décembre 1997.
16. Parmi les exemples assez récents de cataclysmes ayant entraîné la formation de raz-de-marée destructeurs, on peut citer les suivants : les *séismes* de Lisbonne en 1755 et d'Arica en 1868, et les *éruptions volcaniques* du Tambora en 1815, du Krakatoa en 1883 et du Katmai en 1902.
17. A.-M. Gerard, *Dictionnaire de la Bible* (Robert Laffont, coll. Bouquins, avec la collaboration de A. Nordon-Gerard et P. Tolleu, 1989).
18. W. Keller, *La Bible arrachée aux sables* (Presses de la Cité, 1962). Ce livre a souvent été réédité, une dernière fois en 2005 par les Éditions Perrin et avec une présentation de Jean-Luc Pouthier.
19. E.J. Opik, *News and comments : asteroids-cratering*, The Irish Astronomical Journal, 13, 1-2, pp. 59-67, 1977. Opik fut l'un des premiers astronomes catastrophistes de l'histoire moderne.
20. K.T. Frost, *The "Critias" and minoan Crete*, Journal of Hellenic studies, 33, pp. 189-206, 1908.
21. S. Marinatos, *The volcanic destruction of minoan Crete*, Antiquity, 13, 1939.
22. F. Fouqué, *Santorin et ses éruptions*, 1879.
23. Plusieurs dates différentes circulent concernant l'explosion du Santorin, notamment l'ancienne date approximative de -1500 conservée seulement comme *un repère*. La date de l'automne 1628 avant J.-C. (-1627) a été

proposée par des volcanologues et est donc crédible, même si elle paraît *bien haute* à beaucoup.

24. A.G. Galanopoulos et E. Bacon, *L'Atlantide, la vérité derrière la légende* (Albin Michel, 1969). Titre original : *Atlantis, the truth behind the legend* (1969).

25. J.-Y. Cousteau et Y. Paccalet, *A la recherche de l'Atlantide* (Flammarion, 1981). En 2008, Yves Paccalet a repris la plume et a écrit un excellent livre sur l'Atlantide : *Atlantide, rêve et cauchemar*, Arthaud, 2008. Il est sous-titré : « La quête du continent perdu ».

26. On a une bonne comparaison avec l'explosion du Tambora en 1815, cataclysme assez semblable d'ailleurs à celui du Santorin et d'une énergie équivalente (magnitude 9,0 et énergie 2×10^{18} joules).

27. M. Krafft, *Guide des volcans d'Europe* (Delachaux & Niestlé, 1974). Un guide complet et très intéressant. Sur Santorin et son histoire, voir pp. 352-367.

28. M. de Grèce, *La Crète, épave de l'Atlantide* (Julliard, 1971).

29. O. Boura, *Les Atlantides. Généalogie d'un mythe* (Arléa, 1993). Ce remarquable ouvrage rassemble une quarantaine de textes grecs, latins, espagnols, français, suédois, italiens, anglais et allemands.

30. idem, citation pp. 11-12.

31. Th. Moreux, *L'Atlantide a-t-elle existé ?* (Doin, 1949).

32. J.V. Luce, *Lost Atlantis : new light on an old legend* (McGraw-Hill, 1969).

33. C. Berlitz, *L'Atlantide retrouvée. Le huitième continent* (Rocher/France-Amérique, 1984). Titre original : *Atlantis, the eighth continent* (1984).

34. J. Deruelle, *De la préhistoire à l'Atlantide des mégalithes* (France-Empire, 1990).

35. P. Duhem, *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic* (Hermann, 10 volumes, 1913-1957). Citation pp. 293-294.

36. W. Chorlton et autres, *Les périodes glaciaires* (Time-Life, 1984). Titre original : *Ice ages* (1983). Le chapitre 4 : *La théorie astronomique* (pp. 119-141) explique la théorie de Milankovic et ses implications.

CHAPITRE 19

13 000 ANS DE CATACLYSMES COSMIQUES

Un avertissement en guise de prologue

Il est nécessaire, avant d'aborder l'histoire de l'impactisme depuis 13 000 ans (en liaison avec le *Younger Dryas Event* mis récemment en évidence) et le catastrophisme qui lui est associé, d'avertir le lecteur. Cela dans un souci d'honnêteté intellectuelle, car il est utile de préciser que le sujet reste spéculatif et controversé. Si la mémoire collective des hommes avait été irréprochable, il n'aurait pas fallu attendre le début du XXI^e siècle pour connaître les grandes lignes des catastrophes cosmiques et terrestres qui ont affecté à plusieurs reprises nos ancêtres de la protohistoire et de l'Antiquité, dans leur vie sociale, et même pour beaucoup d'entre eux dans leur chair.

Comme je l'ai expliqué dans différents chapitres, c'est seulement à l'époque actuelle que des éléments nouveaux et incontestables pour progresser ont été obtenus. Des éléments astronomiques surtout, grâce aux nouvelles techniques d'observation et à l'informatique. Ces progrès ont permis de mieux comprendre ce qui a pu se passer, et aussi de nous faire connaître de nombreux objets cosmiques nouveaux, dont certains sont apparentés aux comètes et aux astéroïdes responsables des catastrophes passées.

En 1982, dans *La Terre bombardée*, j'ai entrepris la première tentative de reconstitution historique de l'impactisme terrestre et de ses conséquences humaines. Depuis la seconde moitié du XIX^e siècle, plusieurs auteurs avaient déjà essayé de faire avancer le problème, à commencer par Ignatius Donnelly (1831-1901) dans un livre fameux : *Ragnarok, or the age of fire and gravel* (1), paru en 1883, mais il faut bien le dire sans réel succès, si ce n'est commercial parfois. Ces auteurs étaient pourtant souvent d'authentiques érudits, bien conscients que l'histoire ancienne des hommes était beaucoup plus complexe que celle, assez misérable, il faut bien le dire, qui était enseignée. Aucun n'était astronome malheureusement, c'est ce qui explique en partie leur échec en ce qui concerne les explications proposées.

Comme je le disais dans la conclusion de mon livre, seuls des spécialistes des astéroïdes ou des autres petits corps du Système solaire (comètes, météores) avec l'aide des spécialistes de mécanique céleste étaient en mesure d'obtenir des éléments décisifs. Et c'est bien ce qui s'est passé, ce sont les astronomes, assez nombreux maintenant à s'intéresser à ce problème essentiel, qui ont fait la différence, notamment ceux de l'école britannique néo-catastrophiste, très en pointe sur le sujet, et surtout débarrassés de tous complexes superflus. Ils surfent donc avec aisance sur un terrain quasiment vierge.

Une obligation : sortir des sentiers battus

J'ai rappelé les mésaventures d'Immanuel Velikovsky (1895-1979) dans le chapitre " *Fausse pistes* ", car son cas est exemplaire, on peut même dire caricatural. Son nom, comme ceux des autres grands pionniers du catastrophisme, est associé à un phénomène de rejet systématique. C'est encore vrai aujourd'hui (à une échelle moindre heureusement). Malgré tous les progrès récents qui montrent chaque année la réalité du catastrophisme d'origine cosmique, et comme tous les auteurs qui ont écrit sur le sujet, je ne serai pas à l'abri de critiques plus ou moins virulentes de certaines catégories de scientifiques et d'historiens trop imbibés de classicisme. La nouveauté dérange, on le sait, elle déstabilise les mandarins en place qui ont du mal à admettre que de nouvelles approches, différentes des leurs, permettent de progresser là où ils ont échoué.

Pourtant, seule une approche vraiment nouvelle peut permettre de percer d'une manière satisfaisante le voile épais qui enveloppe encore l'histoire naturelle des hommes depuis 13 000 ans. Pour progresser il est nécessaire de sortir des sentiers battus.

L'histoire mondiale des différentes civilisations du passé est pourtant assez bien connue maintenant dans son ensemble (2). Des siècles de recherches et de découvertes ont permis de broser une synthèse acceptable, bien que les documents écrits ou gravés authentiques remontant avant 2000 avant J.-C. soient rares, et qu'il subsiste de sérieux problèmes avec certaines langues mortes qui résistent à toutes les tentatives de déchiffrement. On sait que l'incendie des grandes bibliothèques de l'Antiquité et la destruction de plus d'un million de volumes et de papyrus, véritable mémoire écrite des hommes du passé, a été le plus grand fléau intellectuel qu'ait jamais connu l'humanité. C'est toute notre Histoire qui est partie en fumée dans cette démonstration de bêtise humaine, tare qui franchit hélas allègrement siècles et millénaires, car il est utopique d'espérer encore la découverte future de documents "miraculeux" qui éclaireraient d'un jour nouveau la protohistoire des hommes.

Ce manque de documents écrits ou gravés fait que l'on connaît très mal l'histoire naturelle des anciennes populations et civilisations. Seule leur histoire domestique est assez bien reconstituée, puisque c'est dans ce domaine que l'on trouve encore des traces indiscutables (villages, outils, bijoux, poteries, etc.). Les catastrophes naturelles subies par les populations ne sont jamais connues avec précision, mais survivent seulement camouflées sous formes de mythes plus ou moins obscurs et déformés. La meilleure preuve à ce sujet est la formidable éruption du Santorin, dont j'ai parlé au chapitre précédent, vers -1600, qui était déjà totalement oubliée dans la Grèce antique, seulement 1000 ans plus tard.

On se rend compte ainsi des difficultés qu'il y a à établir *la chronologie* et parfois *la nature* même des différents cataclysmes naturels du passé. Mais depuis le début des années 1980 les choses se sont éclaircies, grâce au

travail de nombreux scientifiques *catastrophistes*, parmi lesquels il convient de citer en premier lieu Victor Clube et Bill Napier, deux astronomes britanniques, qui ont publié ensemble deux livres essentiels : *The cosmic serpent* en 1982 et *The cosmic winter* (3) en 1990.

Ce qui est intéressant c'est que ce problème des catastrophes cosmiques est devenu un sujet d'étude multidisciplinaire, preuve à la fois de son intérêt et de sa crédibilité, de sa complexité aussi. Ainsi des chercheurs de formation différente, comme le mathématicien italien Emilio Spedicato, les géologues autrichiens Alexander Tollmann (1928-2007) et Edith Kristan-Tollmann (1934-1995), le paléocéanographe américain Cesare Emiliani (1922-1995), le paléoécologiste britannique Mike Baillie, l'astronome américain Paul LaViolette, l'érudit américain Alfred de Grazia, catastrophiste convaincu et initiateur de la quantavolution, le physicien américain Barry Warmkessel, le géophysicien et mythologue grec Stavros Papamarinopoulos, l'archéologue catastrophiste grecque Amanda Laoupi et deux géologues femmes, la Française Marie-Agnès Courty et l'Américaine Dallas Abbott, ont proposé des solutions nouvelles et stimulantes, sans parvenir toutefois, malgré leur notoriété reconnue et l'importance de leurs travaux, à convaincre la communauté scientifique qui reste très conservatrice dans sa majorité.

Dans plusieurs chapitres précédents, j'ai parlé de savants comme Fred Hoyle et Francis Crick qui ont été marginalisés pour certaines de leurs recherches sortant de l'ordinaire. A plus forte raison, des chercheurs indépendants comme les Britanniques Graham Hancock et Robert Bauval, et l'ingénieur maritime italien (et amiral) Flavio Barbiero ont aussi du mal à se faire entendre de la communauté scientifique, conservatrice dans sa majorité (notamment les mandarins). Leur travail n'en est pas inintéressant pour autant. Au contraire ! Ils ont mis le doigt dans le domaine controversé de l'archéoastronomie, très mal connu et riche de promesses à venir.

Pour écrire ce chapitre, j'ai tenu compte des nombreuses nouveautés notées dans les chapitres précédents, mais le canevas reste le même que celui retenu pour *La Terre bombardée* de 1982. En effet, les cataclysmes retenus restent les mêmes, explicités pour certains d'entre eux par l'hypothèse Hephaistos qui les éclaire parfois sous un jour vraiment nouveau et qui justifie aussi leur fréquence qui paraissait un peu suspecte autrement.

L'Apocalypse de l'an 10000 avant J.-C. : mythe ou réalité ?

Dans son dictionnaire *Les archives de l'insolite*, Jean-Louis Bernard (1918-1998), un historien et érudit français, donne la définition suivante pour l'article "*Apocalypse de l'an -10000*" (4) :

" Série de catastrophes qui se produisirent vers l'an 9 ou 10000 avant notre ère, en touchant l'ensemble de la planète, et à propos desquelles il y a accord entre la Tradition et la science moderne. Enumérons ces cataclysmes : en Europe, fin de la dernière période glaciaire, peut-être à la suite d'une montée du

pôle vers le nord actuel, par compensation, le dessèchement du Sahara préluda ou s'accéléra ; fin probable de l'archipel d'*Atlantide* ; en Afrique orientale, exhaussement brutal des monts, avec disparition d'une mer intérieure (aux sources du Nil) et d'un archipel (*Pount*), vers l'océan Indien ; exhaussement possible des Andes, avec disparition d'archipels en océan Pacifique (et isolement de la fameuse île de Pâques)... "

Cette définition n'est que très partiellement satisfaisante, car elle tente de regrouper sur une courte période plusieurs catastrophes prouvées, ou purement hypothétiques, d'époques en fait fort différentes, puisqu'elles s'échelonnent sur plusieurs milliers d'années. J'aurai l'occasion de reparler de certaines d'entre elles. Ce qu'il faut retenir, c'est que cette date de -10000 (chiffre très arrondi évidemment, simple repère chronologique en fait) est une date clé de l'histoire récente de la Terre et des hommes.

Mais d'abord, est-on vraiment sûr qu'il y a eu cataclysme ? Les avis ont été longtemps très partagés, faute de preuves incontestables. La fin rapide de la dernière glaciation est une certitude, avec ses deux conséquences principales : réchauffement du climat et surtout relèvement très important (de 100 à 180 mètres selon les régions) du niveau des eaux océaniques. Celles-ci ont complètement transformé la géographie côtière, en envahissant progressivement les différents talus continentaux. La mini-extinction de la mégafaune américaine, qui date de la fin du Pléistocène, est avérée elle aussi depuis les années 1940. La double question que se posaient les scientifiques était donc la suivante : Qu'est-ce qui a bien pu entraîner une modification aussi radicale et aussi rapide du climat ? Et pourquoi tant d'espèces animales ont disparu en si peu de temps ?

Depuis le début du XXI^e siècle, une nouvelle théorie multidisciplinaire, restée jusque-là simple hypothèse faute de preuves incontestables, souvent connue sous le nom de *l'extinction du Pléistocène*, est apparue dans la littérature scientifique. Elle est liée au phénomène géophysique et climatique connu depuis longtemps des spécialistes sous le nom de *Younger Dryas Event* (*l'événement du Dryas récent* en français).

L'examen approfondi de cette théorie a fait l'objet d'une importante conférence qui s'est déroulée à Acapulco en mai 2007. Elle a été suivie par de nombreux scientifiques d'horizons et de spécialités différents, qui ont apporté des contributions inédites, complémentaires et convaincantes. L'origine cosmique de l'extinction du Pléistocène est apparue comme une quasi-certitude. La théorie a donc pris de la consistance, nourrie par de multiples preuves et arguments souvent définitifs et incontournables. Ses promoteurs croient qu'elle est appelée à un succès comparable à celle qui a expliqué la fin cosmique des dinosaures. Ce n'est qu'une question de temps, comme toujours quand il s'agit d'une théorie nouvelle, et très importante dans le cas présent. Les mentalités ont souvent du mal à évoluer, surtout chez les anciens chercheurs qui n'aiment pas remettre en cause leurs certitudes.

Le Younger Dryas Event et l'extinction du Pléistocène

La conférence d'Acapulco de mai 2007

Plusieurs scientifiques internationaux ont reçu, début 2007, une invitation pour participer à une conférence organisée sous l'égide de l'Union géophysique américaine (l'AGU, pour *l'American Geophysical Union*), et devant se dérouler à Acapulco, au Mexique, du 22 au 25 mai 2007. D'autres, qui avaient quelque chose à dire, et qui ne voulaient pas manquer une réunion qu'ils prévoyaient historique (et elle le fut, fondatrice même d'après certains participants), se sont invités eux-mêmes. Le sujet annoncé, alléchant pour de nombreux chercheurs, était le suivant : *New Insights into Younger Dryas Climatic Instability, Mass extinction, the Clovis People, and Extraterrestrial Impacts*. Cette conférence se voulait donc résolument multidisciplinaire, seul moyen efficace pour faire confronter les différents points de vue, et donc pour faire avancer les connaissances.

Le texte de présentation de la conférence expliquait notamment :

“ La déglaciation qui a suivi la dernière période glaciaire a été brutalement et spectaculairement interrompue il y a environ 12 900 ans par un refroidissement étendu qui marque le début du Dryas récent. De nombreux signes montrent que le Dryas récent a été marqué par des changements soudains dans la configuration de la calotte glaciaire, l'assèchement soudain des lacs préglaciaires, le détournement des flots d'inondation de l'Amérique du Nord vers l'Atlantique nord, et la réorganisation de la circulation de l'eau des océans...

Le début du Dryas récent paraît avoir coïncidé également avec des changements massifs, étendus et ponctuels dans la faune et le développement culturel paléolithique centré en Amérique du Nord et en Amérique du Sud. Ceci est représenté par la plus récente de toutes les extinctions massives, la disparition de la mégafaune des Amériques, comprenant les mammoths, les chevaux et les paresseux et la fin de la culture Clovis et les autres cultures humaines paléolithiques contemporaines...

Une nouvelle hypothèse avance que le refroidissement du Dryas récent a été déclenché par des impacts extraterrestres qui ont provoqué la déstabilisation de la calotte glaciaire, le détournement des eaux d'inondation, et les changements dans les courants océaniques. Ce travail offre des preuves nouvellement découvertes d'un impact ou d'explosions aériennes extraterrestres il y a 12 900 ans, comprenant des sédiments de la période de Clovis dans toute l'Amérique du Nord avec des niveaux élevés en iridium, des sphérules magnétiques et en

carbone, du carbone ressemblant à du verre, des fullerènes, et des proportions de gaz nobles extraterrestres souvent associés aux couches carbonifères (tapis noirs) avec un biote inhabituel... ” (5)

Cette extinction concernant la mégafaune d'Amérique du Nord avait été notée dès les années 1940 par l'archéologue américain Frank Hibben (1910-2002), à la suite d'une expédition en Alaska qui l'avait beaucoup marqué et qu'il a racontée dans son livre *The lost Americans* (6). Il avait trouvé dans la boue gelée des restes d'animaux disparus comme les mammoths et les mastodontes mélangés aux ossements d'animaux d'autres espèces qui ont réussi à survivre comme des bisons et des ours. Pour lui, le cataclysme de très grande ampleur ne faisait pas de doute, mais sa nature restait totalement inexpliquée.

On sait que cette décimation n'a pas seulement concerné l'Amérique du Nord, mais qu'elle s'est manifestée aussi en Europe avec les rhinocéros géants, en Sibérie avec les mammoths et les bisons et aussi dans tout le nord de la Terre. On parle d'une disparition de 80 % des grands mammifères et même de l'extinction totale de certaines espèces. Dans son livre *Les grands bouleversements terrestres* (7), paru en 1955, Velikovsky publia plus d'une centaine de citations extraites de livres et d'articles sur le sujet, qui toutes racontent la réalité et les conséquences d'un même événement. Les causes étaient indéfinies pour la majorité des auteurs qui ont traité le sujet. Velikovsky, lui, catastrophiste convaincu, parlait clairement de *noyaux cométaires* comme possibles responsables. Mais ce chercheur avait une très mauvaise image auprès des scientifiques américains et il ne fut pas entendu. Dans les années 1950, le catastrophisme n'était vraiment pas à la mode !

Tous les animaux retrouvés gelés ont, semble-t-il, été surpris par un événement imprévisible et imparable qui ne leur a pas laissé le temps de se mettre à l'abri. En un seul jour, la vie a été anéantie en de nombreux endroits. Dès les années 1940, tous les scientifiques qui ont étudié les divers débris et les terrains choqués ont été obligés d'admettre que la théorie de l'uniformitarisme, en vogue à l'époque, ne pouvait pas rendre compte des effets produits, et qu'il était nécessaire de mettre en jeu un événement cataclysmique. Mais lequel ? Hibben a simplement écrit : « *La période du Pléistocène a fini dans la mort. Ce n'était pas une extinction ordinaire d'une période géologique vague qui s'est finie dans une fin incertaine. Cette mort était catastrophique et globale.* » Mais lui aussi a un peu parlé dans le vide.

De l'aveu même des scientifiques qui y ont participé, la conférence d'Acapulco de mai 2007 a été très bénéfique pour l'amélioration globale des connaissances sur le sujet, dans la mesure où ils ont pu échanger leurs points de vue, expliquer leurs observations, leurs données et leurs simulations aussi, et tenter de trouver un scénario plausible et acceptable pour ce *Younger Dryas Event* qui est devenu également un phénomène astronomique puisque l'impact cosmique (comète ou astéroïde) ne fait plus de doute. Les preuves se multiplient et les contradicteurs se raréfient.

La nouvelle théorie

On envisage désormais une comète de 2 ou 3 km de diamètre (certains spécialistes parlent même de 4 km), venant probablement du nord-ouest, qui se serait fragmentée en entrant dans l'atmosphère au-dessus de l'Amérique du Nord. L'impact a été le déclencheur, la cause du cataclysme le plus important qu'ait connu notre planète depuis 13 000 ans. Maintenant sa compréhension globale ne peut être que multidisciplinaire puisque plusieurs sciences sont concernées (8).

La comète (ou un fragment majeur) a heurté l'immense glacier qui recouvrait la région des grands lacs. On parle aussi de la baie de l'Hudson un peu plus au nord. L'inlandsis laurentidien aurait été partiellement déstabilisé, phénomène qui aurait entraîné la vidange partielle du réservoir d'eau douce constitué par le lac Agassiz qui était le plus grand lac glaciaire d'Amérique du Nord. On pense qu'il pouvait mesurer 1500 km de long et 1100 km de large et qu'il avait une profondeur moyenne de l'ordre de 200 mètres. Une grande quantité d'eau douce et froide aurait ainsi été injectée dans l'Atlantique nord, entraînant une très importante baisse de la température (on parle de 5 degrés).

Les chercheurs de diverses disciplines ont analysé une cinquantaine de sites archéologiques américains liés à la culture dite de Clovis. Ils y ont trouvé une fine couche riche en carbone datant de 12 900 ans, avec une condensation anormale d'iridium, élément presque toujours associé à un événement extraterrestre. Des nanodiamants et des fullerènes ont également été découverts, ce qui a encore renforcé l'hypothèse de l'origine cosmique de la catastrophe.

On voit que la comète a été le déclencheur de toute une réaction en chaîne associée à plusieurs événements climatiques, géologiques, paléontologiques, sans parler évidemment des conséquences humaines qui ont dû être épouvantables, non seulement en Amérique, mais dans tout le nord de la Terre. On pense notamment à un ou plusieurs tsunamis géants qui auraient balayé les côtes européennes. L'Europe a elle aussi été concernée parce que l'on a retrouvé des traces du cataclysme cosmique en Belgique (sur le site de Lommel). Le géologue néerlandais Johan Kloosterman, un catastrophiste convaincu et militant, qui a étudié le site de Lommel, espère pouvoir démontrer que c'est le même cataclysme qui a mis fin à la culture magdalénienne en fouillant certains abris sous roche européens. S'il réussit à trouver les preuves indispensables, c'est toute l'histoire des hommes qui sera remise en cause.

De plus, l'hypothèse cométaire permet d'expliquer assez bien l'important refroidissement constaté à cette période et qui aurait duré un bon millier d'années. Les particules issues de l'explosion de la comète auraient augmenté d'une manière importante l'absorption de l'énergie du Soleil, phénomène qui aurait accéléré la fonte du glacier.

Certains scientifiques croient aussi aujourd'hui que les fameuses *Carolina Bays*, qui existent par centaines de milliers dans l'ouest des Etats-Unis, pourraient avoir été formées par effet de souffle à l'occasion de ce cataclysme cosmique. On a trouvé dans certaines d'entre elles des traces (d'iridium notamment) qui semblent conforter l'hypothèse astronomique pour leur formation. On sait que l'absence de météorites et d'impactites dans et à proximité de ces structures ont toujours fait douter d'une origine extraterrestre pour les *Carolina Bays*, mais en fait elles s'intègrent bien dans un cataclysme global.

L'astronomie propose deux autres solutions possibles pour expliquer la cause de cette "*Apocalypse de l'an -10000*" (date repère évidemment), une astéroïdale et l'autre cométaire.

L'hypothèse Sithylenkat

J'ai déjà parlé du cratère météoritique de Sithylenkat, découvert en 1972 par le satellite Landsat 1, dans une région montagneuse et déserte de l'Alaska. Cette découverte a permis d'envisager une corrélation avec la fin de la dernière glaciation, puisque l'on a attribué (approximativement) un âge de 12 000 ans à ce cratère.

Une première étude géologique et géographique de la région eut lieu en 1969, avant même que l'on soupçonne l'origine météoritique du cratère (9), puisque vu du sol, rien ne semble indiquer son caractère exceptionnel. Il s'agit d'une vaste dépression de 12,4 km de diamètre et de 500 mètres de profondeur. Son nom dans l'idiome local signifie "le lac dans les collines", car au fond de la dépression existe un lac de 3 km environ de diamètre. Des échantillons prélevés à l'intérieur du cratère montrèrent une proportion anormale de nickel qui étonna les chercheurs. D'autant plus que cette forte concentration de nickel fut également mise en évidence dans des échantillons périphériques à la dépression elle-même. En outre, une étude magnétique de la région indiqua une anomalie négative associée avec cette dépression, ce qui signifie une intense fracturation du lit du cratère, en dessous de la zone d'impact.

S'il n'est pas reconnaissable du sol comme cratère d'impact, par contre Sithylenkat fut immédiatement repéré par le premier *Landsat*, comme ce fut d'ailleurs le cas pour plusieurs autres formations disséminées dans le monde entier. Des reconnaissances aériennes effectuées en 1976 ont montré la présence de fractures dans les murs du cratère, et son origine cosmique n'est pratiquement plus contestée.

L'énergie cinétique libérée lors de l'impact de Sithylenkat est de l'ordre de $1,1 \times 10^{20}$ joules. Cette valeur est donc comparable à l'énergie dégagée par les deux événements les plus cataclysmiques de l'époque historique : l'éruption du Tambora en 1815 et le séisme du Chili en 1960. Cependant, bien que cette énergie dégagée ne soit pas extraordinaire en elle-même, il n'est pas tout à fait exclu qu'elle ait servi comme énergie additionnelle pour

mettre en route, ou pour accélérer, un glissement de la lithosphère (rigide) sur l'asthénosphère (visqueuse) sous-jacente. Ce glissement aurait pu durer quelques dizaines ou centaines d'années et amener le pôle géographique à son emplacement actuel. J'ai parlé au chapitre 13 de ces migrations polaires auxquelles quelques (rares) scientifiques croient fermement, même si leurs causes, qui peuvent être multiples, restent encore mal connues.

Mais est-il vraiment crédible que le dernier déplacement soupçonné ait pu faire dériver l'écorce terrestre sur près de 3000 km, comme l'a écrit Charles Hapgood (1904-1982), et amener le pôle géographique nord de la baie d'Hudson à son emplacement actuel ? Bien que ce mécanisme explique parfaitement la fin subite de la glaciation, beaucoup de chercheurs pensent plutôt à un cataclysme de moindre envergure.

Il faut retenir deux choses concernant Sithylemenkat. D'abord la présence de nickel à l'intérieur et autour du cratère signifie obligatoirement l'impact d'une sidérite ou d'une sidérolithe. Ce qui exclurait que ce soit un fragment de Hephaistos, objet carboné d'origine cométaire. Ensuite on peut remarquer que la simple collision d'un EGA de 600 mètres, comme ce fut le cas à Sithylemenkat, c'est-à-dire dans une région proche du cercle polaire, est capable de faire des dégâts très importants au niveau de la cryosphère. La fantastique chaleur dégagée a pu perturber la distribution des glaces sur plusieurs milliers de kilomètres carrés, mais de là à envisager qu'elle ait pu entraîner une déglaciation générale, il y a une marge infranchissable.

L'hypothèse Sithylemenkat n'est pas incompatible avec la précédente. Il est possible que l'impact de l'astéroïde ait précédé l'impact cométaire de quelques milliers d'années. On sait que la courbe des variations climatiques comprises entre 20 000 et 10 000 ans comprend plusieurs hiatus qu'un impact cosmique (comète ou astéroïde) pourrait fort bien expliquer.

Un impact d'astéroïde dans l'Atlantique ?

Cette hypothèse de l'impact océanique a déjà été proposée par plusieurs auteurs, notamment par l'ingénieur allemand Otto Muck (1892-1956) (10) au début des années 1950. Comme Velikovsky, il s'est discrédité en donnant une date trop précise pour l'impact de l'astéroïde : le 5 juin de l'année 8498 avant J.-C. dans le calendrier grégorien, date qui correspondrait au jour Zéro de la chronologie des Mayas qui remonte à plusieurs milliers d'années. Le jour de l'impact serait également d'après Muck, le fameux jour de la disparition de l'Atlantide (celle de Platon). Il donne de multiples raisons et arguments pour justifier son hypothèse, mais il n'a jamais pu convaincre le monde scientifique (très conservateur) de son époque.

Muck a pressenti aussi que les *Carolina Bays* pourraient être liées à l'impact de l'objet cosmique et qu'elles auraient été formées par effet de souffle. Cette hypothèse, longtemps discréditée, refait actuellement surface et pourrait bien être la bonne, comme je l'ai expliqué dans la section précédente. Ouragan et tsunami d'origine cosmique semblent bel et bien avoir eu lieu.

Il faut donc revenir à l'idée de Georges Cuvier (1769-1832) dont j'ai rapporté les propos au chapitre 3 : cette "vague" géante qui a inondé les continents. En fait, la meilleure explication est encore la formation d'un tsunami d'origine cosmique, c'est-à-dire consécutif à un important impact océanique ou dans une région glacée qui a instantanément fondu. Ce tsunami, qui pourrait avoir dépassé le kilomètre de haut d'après certaines simulations, s'est transformé en un gigantesque mur d'eau et de boue au fur et à mesure de son avance sur les continents. Il a pu tout balayer sur son passage, et détruire plusieurs peuplades de l'époque qui vivaient à proximité des côtes, et faire reculer la civilisation de quelques milliers d'années. On sait que la culture américaine de Clovis a pratiquement été anéantie à cette époque, comme l'a montré Hibben dans les années 1940. Le recul démographique, mais aussi culturel, a dû être très important pour les générations qui ont suivi celle qui a été victime directe du cataclysme.

C'est probablement cette catastrophe obscure qui est restée dans la mémoire des hommes comme étant le Chaos ou bien encore l'Apocalypse, la vraie, la première, celle qui a survécu dans le subconscient des hommes à travers les millénaires. Elle a pu se doubler d'une période de recul, durant laquelle l'homme survécut misérablement, conscient de sa faiblesse face aux formidables forces cosmiques, d'où la mise en place d'un incroyable panthéon de divinités protectrices. Mais l'aventure humaine allait reprendre son essor irrésistible vers le Néolithique, quand les séquelles de la catastrophe s'estompèrent pour ne plus devenir qu'un souvenir d'apocalypse transmis de génération en génération.

Un leurre : l'Atlantide atlantique de Platon

Cette époque voisine de -10000 a été souvent utilisée par les auteurs qui ont écrit sur l'Atlantide. On sait, en effet, que Platon (427-347) racontait dans ses deux récits, le *Timée* et le *Critias*, que c'est à cette date que s'était engloutie l'île mythique (et très controversée dès l'Antiquité), suite à un cataclysme dont il ne précisait pas d'ailleurs la nature mais qui remontait à soi-disant 9000 ans avant lui. Plus de 5000 livres ou articles ont, dit-on, été écrits sur le sujet, et je n'y reviens brièvement que pour faire deux remarques. D'abord, il est possible que le tsunami géant (s'il a réellement eu lieu) déclenché par un impact océanique ait détruit, outre bien sûr les populations, quelques petites îles et modifié quelque peu la géographie côtière de l'époque. Mais il ne peut avoir englouti définitivement une île grande "comme l'Asie (mineure) et la Libye réunies" pour reprendre l'expression de Platon. On pourrait certes alléguer qu'un impact sérieux a provoqué des séismes d'une magnitude extrême et englouti des continents entiers, mais l'examen des fonds océaniques n'a jamais confirmé ces engloutissements.

Ce qui est sûr, par contre, c'est que la fonte des glaces (quelle que soit sa cause) a fait remonter sensiblement le niveau des océans, et que cette montée des eaux a rayé de la carte bon nombre de terres anciennement émergées. Mais les océanographes n'ont eu aucune peine à démontrer que

cette montée des eaux a été progressive et s'est étalée sur plusieurs milliers d'années, en liaison avec le réchauffement général du climat de la planète. Donc, on peut dire que le tsunami a éliminé les populations côtières et îliennes et que la transgression marine a noyé des îles et plusieurs millions de kilomètres carrés de terres anciennement habitées.

Un impact sérieux en Autriche vers -7800

Le village de Köfels se trouve à environ 60 km au sud-ouest de Innsbrück dans le Tyrol autrichien, à 400 mètres d'altitude par rapport au fond de la vallée du massif de l'Ötztal. Il intéresse depuis longtemps les géologues, car sur son territoire se trouve une formation de 5 km de diamètre que l'on soupçonne d'être le plus récent des grands cratères d'impact terrestres. C'est une formation de montagne qui ne présente pas la netteté d'un cratère de plaine et qui pose des problèmes non résolus. Certains géologues modernes anticatastrophistes ne veulent même pas en entendre parler, ne voyant dans le "cratère" de Köfels qu'un résidu d'*éboulement* gigantesque. Pour eux, la montagne se serait effondrée pour une raison indéterminée, peut-être un tremblement de terre, peut-être aussi en liaison avec la fonte des glaces.

Il n'empêche que ces géologues sont bien en peine pour expliquer les éléments dont je vais parler maintenant. On a trouvé, en effet, dans la région de Köfels de nombreux verres ressemblant à des pierres ponces vésiculaires qui ont été étudiées dès le XIX^e siècle. Ces verres ont une composition chimique qui peut être expliquée par une courte et incomplète fusion à très haute température des roches préexistantes, suivie d'un très rapide refroidissement.

Les premiers chercheurs qui ont analysé ces verres, notamment Adolf Pichler (1819-1900) en 1863 et W. Hammer en 1923 (11), les ont interprétés comme étant les produits d'un événement volcanique, quoique aucun volcanisme récent ne soit connu dans les Alpes, et que la structure de Köfels n'ait rien d'une bouche volcanique. Conscients de ces anomalies, Otto Stutzer (1881-1936) en 1936 et Franz Suess (1867-1941) en 1937 ont proposé l'origine cosmique pour le cratère et les verres qui seraient donc bel et bien des *impactites*.

Depuis 1966, plusieurs géologues les ont étudiés à nouveau et ont confirmé qu'ils ne peuvent être volcaniques. De plus, le cratère a gardé des traces de la collision et on a pu mettre en évidence certains effets de *métamorphisme de choc*. C'est sûr qu'il y a eu éboulement, mais celui-ci a été la *conséquence* de l'impact qui a "cassé" la montagne. On doit donc parler pour l'origine du cratère de Köfels de "impact + éboulement", alors que d'autres géologues veulent s'en tenir à l'éboulement sans impact, ignorant les impactites qui demandent pour être formées une énergie d'une ampleur nettement supérieure à celle résultant d'un éboulement, même si celui-ci est d'envergure, ce qui a été le cas de toute manière.

Récemment, on a parlé aussi de traces d'*iridium*. Si cette découverte était confirmée, ce serait la preuve qu'il y a bel et bien eu impact cosmique. D'ailleurs, le cratère de Köfels a été remonté en catégorie 2 des structures d'impact (les probables). Pendant des années, selon les auteurs, Köfels était classé en catégorie 3 (les possibles) ou même 4 (structures rejetées). D'ici quelques années, Köfels pourrait très bien passer en catégorie 1 (structures certaines), confirmant l'impact très récent d'un objet d'envergure sur la Terre, avec toutes les conséquences terrestres et humaines qui en découlent.

Car ce qui est intéressant avec Köfels, c'est l'extrême jeunesse du cratère et des verres, notée dès les premières recherches. Toutes les datations modernes et précises ont confirmé cette jeunesse puisque la collision ne remonte qu'à 9800 ans environ, soit autour de *la date historique* -7800. Ce cataclysme est plus récent de 3100 ans environ que celui du *Younger Dryas Event*, qui fut une catastrophe d'une tout autre envergure.

Pour former le cratère de Köfels, il a fallu un petit ast ro ide de 250 mètres de diamètre environ, probablement d'origine planétaire. L'impact, selon les normes classiques, a libéré une énergie de l'ordre de $8,2 \times 10^{18}$ joules, soit l'équivalent d'un très important séisme de magnitude 8,6.

Même si la collision de Köfels n'a pu avoir que des incidences régionales au niveau énergétique, il est certain que le volume de débris expédiés dans l'atmosphère a été très important. Il y a eu probablement désintégration complète   l'instant de l'impact, puisqu'on n'a pas retrouvé de météorites dans la région. Comme pour d'autres cataclysmes similaires, les poussières résiduelles se sont dispersées sur pratiquement toute l'Europe (et sans doute au-delà) et ont entraîné une période de "ténèbres", ou tout au moins un obscurcissement de l'atmosphère, de plusieurs jours ou même plusieurs semaines, le temps que celle-ci se débarrasse de cet aérosol.

Cette collision probable remonte à -7800, et bien que la vallée de l'Ötztal n'ait sans doute été qu'assez peu peuplée à cette époque, il est probable qu'elle a été observée dans toute l'Europe centrale. La boule de feu avant l'impact a dû être aveuglante et les populations ont dû croire que le Soleil (ou un soleil) tombait sur la Terre. On peut donc penser que ce cataclysme a eu, avec d'autres non identifiés encore avec précision, des répercussions sur la mise en place de concepts religieux, sur la croyance en l'effondrement de la voûte céleste, et sur la peur qu'avaient les Anciens que le ciel leur tombe sur la tête. L'impact de Köfels est l'un des jalons reculés qui permettaient aux auteurs de l'Antiquité d'affirmer que la chute du ciel est cyclique.

On comprend mieux que la transmission de bouche à oreille d'un tel événement pendant plusieurs milliers d'années ait débouché sur de nombreuses variantes régionales. Plusieurs chutes de météorites beaucoup moins importantes ont aussi été observées par la suite, et elles ont sans doute servi à entretenir ce mythe ancestral de la chute du ciel, car ce n'est pas quand même tous les millénaires que s'écrase sur l'Europe un ast ro ide de 250 mètres, comme celui qui forma le cratère de Köfels.

"La Nuit de l'écroulement des mondes" des anciens Égyptiens

Le *Livre des Morts des anciens Égyptiens* (12) est l'un des plus vieux documents que les hommes du passé nous ont légués. Il existait déjà (tout au moins les chapitres les plus importants) vers 2700 ans avant J.-C., sous le règne du pharaon Men-kau-ra de la IV^e dynastie. Mais il pourrait remonter encore plus loin et dater du IV^e millénaire avant notre ère.

L'un des leitmotifs de ce *Livre des Morts* est la succession de catastrophes cosmiques et la fréquence de l'écroulement des mondes. Les cataclysmes cosmiques rappelés sommairement, et sans détail précis malheureusement, sont obligatoirement antérieurs à -2700 et ne peuvent être confondus avec le cataclysme beaucoup plus récent dont je parlerai plus loin. Tout ce que l'on peut dire c'est que ces anciennes catastrophes cosmiques furent une réalité, même s'il n'est pas facile de savoir à quoi elles correspondent exactement. Le *Livre des Morts* insiste particulièrement sur " *la Nuit de l'écroulement des mondes* " qui semble avoir été une catastrophe de réelle envergure, tout au moins au niveau de l'Afrique du Nord dans son ensemble.

Un impact en Afrique du Nord

De nombreux arguments laissent à penser que l'Afrique du Nord a été victime d'un impact cosmique d'origine cométaire assez important, qui pourrait dater de la fin du VI^e millénaire avant J.-C. (autour de -5000). Plusieurs auteurs pensent en effet que l'Égypte archaïque était très différente géographiquement de l'Égypte historique, qui commence pratiquement avec Ménès, le pharaon qui vécut vers -3300 et qui fonda la première dynastie. Tous les documents semblent indiquer que les premiers Égyptiens venaient de l'ouest (13), d'où ils furent chassés par ce fameux cataclysme cosmique, et qu'ils s'intégrèrent avec une seconde ethnie venant du sud, à une population beaucoup plus primitive qui vivait déjà sur les bords du Nil.

Cette migration forcée des pré-Égyptiens pousse à soupçonner un impact saharien. Il est certain que cette zone immense, qui est aujourd'hui le plus grand désert du monde (avec environ huit millions de kilomètres carrés) et l'un des plus arides, était un territoire verdoyant, habité dès la haute préhistoire. L'ancien Sahara était baigné par un grand fleuve, le fleuve des Tritons, qui coulait du sud au nord, parallèlement au Nil, et au bord duquel devaient vivre principalement les populations de l'époque. Le tracé de ce fleuve fossile a pu être reconstitué avec précision car il a laissé son empreinte indélébile, même si de nos jours elle n'est pas évidente pour les non-spécialistes. Le fleuve des Tritons descendait du Hoggar, et après un cours de 2000 km et la traversée de deux lacs importants (lacs Tritonis et Pallas) se jetait dans le golfe de Gabès, qui avait une géographie sensiblement différente de celle d'aujourd'hui. Ce n'était donc pas un simple ruisseau saisonnier, et depuis des millénaires il contribuait avec ses différentes ramifications à humidifier et à rendre prospère une vaste région.

La désertification du Sahara a toujours étonné les spécialistes des climats par sa rapidité fulgurante, notamment son début, car ensuite les choses s'enchaînent naturellement selon un processus bien connu. Faire croire que ce sont quelques troupeaux de chèvres et autres animaux domestiques qui ont été *la cause* de la désertification des huit millions de kilomètres carrés du Sahara est une plaisanterie.

Il est beaucoup plus logique de penser que ce phénomène est dû au départ à un cataclysme naturel. Celui-ci n'a jamais pu être identifié, ni localisé avec précision, car il remonte à plusieurs milliers d'années, mais toutes les mythologies des peuples autochtones et périphériques, que ce soient les Égyptiens, les Marocains, les Berbères, les Touaregs et d'autres, parlent de cataclysme *cosmique*. Ce n'est pas sans raison. Je penche donc pour l'explosion dans la basse atmosphère, comme en 1908 avec le cataclysme de la Toungouska, d'un objet cométaire, ou d'origine cométaire. L'hypothèse Hephæistos permet maintenant d'envisager sérieusement l'impact d'un des innombrables fragments générés par la désintégration de cet ancien centaure venu il y a quelques dizaines de milliers d'années dans le Système solaire intérieur.

Cette explosion dans l'atmosphère serait à la base du processus de désertification. Nous avons vu comment une telle explosion peut rayer toute vie sur plusieurs milliers de kilomètres carrés. Des incendies immenses de forêts, l'absence totale de végétation durant plusieurs années dans une région torride ont des conséquences climatiques et écologiques certaines. Les précipitations s'affaiblissent, la sécheresse s'installe, ce qui accélère ensuite l'ensablement, les fleuves et rivières s'assèchent et la désertification peut ainsi gagner très rapidement du terrain.

Des populations traumatisées

Ce scénario explique fort bien que les habitants de la région sinistrée aient été obligés d'émigrer vers les régions périphériques. Ce fut le cas pour les pré-Égyptiens, mais aussi pour d'autres peuples martyrs, ancêtres des populations actuelles d'Afrique du Nord. D'autre part, cette explosion dans l'atmosphère a pu entraîner une augmentation de la radioactivité (comme dans la région sinistrée de la Toungouska) et des radiations anormales et dangereuses. Le taux de radioactivité locale et régionale a pu dépasser les seuils supportables pour l'organisme humain. De nombreux textes du passé, qui ont été raillés un peu à la légère par des savants ignorant tout de l'impactisme terrestre, parlent de pollution biologique et même psychique.

Cette pollution biologique a pu déboucher à la fois sur une dégénérescence des cellules (du fait de brûlures et de cancers, notamment de la peau), et à la limite sur une dégénérescence de certaines espèces dans leur ensemble, et sur un gigantisme (noté également dans la région sinistrée de la Toungouska) probablement sans avenir durable. Or de nombreuses légendes parlent d'êtres dégénérés et de géants existant à l'époque protohistorique. Sont-elles tout à fait dénuées de fondement ? Ce n'est pas si sûr. Hésiode et

Homère qui vivaient au premier millénaire avant J.-C. parlent encore de géants dégénérés, de Titans, de Cyclopes (14) et autres créatures suspectes. On raconte même que ces géants auraient survécu jusque vers l'an 1000 avant J.-C. dans le Haut-Atlas marocain, où la tradition populaire les prétendait cannibales.

On sait de manière formelle depuis l'événement de la Toungouska (même si certains chercheurs occidentaux, qui n'ont pas eu accès au site avant les années 1980, le nient avec véhémence), qu'une explosion dans l'atmosphère peut déboucher sur des mutations dans la faune et la flore par suite de radiations. Ce souvenir d'une population de géants, ou même de monstres, qui étonnaient tant les auteurs du monde antique, au point qu'ils ont consigné leur existence dans leurs chroniques et leurs légendes, était peut-être bien basé sur des faits et des observations réels.

L'avenir pourra peut-être confirmer cet impact saharien, le dater avec précision quand on connaîtra mieux le passé des fragments de Hephastos, et aussi localiser la région de l'impact d'une manière plus précise. En tout cas, cette hypothèse saharienne présente de multiples avantages, car elle explique d'une manière fort plausible à la fois le début ou l'accélération de la désertification du Sahara, l'exode des pré-Egyptiens et leurs innombrables allusions à cette *Nuit de l'écroulement des mondes* qui, apparemment, les avait sérieusement traumatisés. Bien que sa datation soit délicate, je penche pour moins de 2000 ans avant Ménès, vers -5000.

Un impact dans le Pacifique vers -2350

Dans toutes les régions du monde, les peuples anciens ont laissé pour la postérité des histoires concernant des déluges plus ou moins importants (15), conséquences de cataclysmes assez divers mais toujours meurtriers (crues exceptionnelles, pluies torrentielles durant plusieurs jours ou même plusieurs semaines, raz de marée, ouragans, déglaciation, rupture de digues naturelles, etc.). Le plus connu en Occident est bien sûr le Déluge biblique qui aurait eu lieu vers -4000, d'après certaines sources archéologiques et non plus d'après *la Bible* (qui le situe plus tard dans le temps), et qui aurait été causé soit par une crue exceptionnelle de l'Euphrate, soit par un raz de marée sismique venu du golfe Persique, peut-être en rapport avec la montée irréversible des eaux océaniques.

Mais ce Déluge, qui a bénéficié d'une publicité toute particulière du fait qu'il figure en bonne place dans *la Bible* n'est probablement pas le plus important qu'ait connu la Terre depuis 13 000 ans. Parmi ces récits de déluges, plus ou moins obscurs comme toujours du fait qu'il s'agit souvent de catastrophes protohistoriques, plusieurs semblent concerner un même événement assez important, qui pourrait avoir été consécutif à l'impact d'un astéroïde ou d'une comète dans l'océan Pacifique (l'océan Oriental des Anciens) *autour de -2350*, époque à laquelle plusieurs civilisations anciennes étaient en place et rayonnaient autour d'elles.

Certains peuples anciens de la région parlent dans leurs légendes et traditions d'une "étoile tombée du ciel" ou d'une "énorme boule de feu" qui serait tombée dans l'océan ou même sur d'anciennes terres émergées, englouties depuis la catastrophe. Comme je l'ai rappelé au chapitre 1, en Chine c'est le dragon Kong-Kong qui aurait fait écrouler l'une des colonnes du ciel un jour de colère en lui donnant un coup de tête et qui aurait provoqué le déluge. Toutes ces histoires ont un point commun : c'est l'origine astronomique du cataclysme, un objet cosmique est entré en collision avec la Terre. Événement qui n'étonnera plus outre mesure les lecteurs qui auront lu ce livre avec attention, puisqu'il se produit régulièrement depuis que notre planète existe. Les océans sont les principales surfaces terrestres visées, puisqu'elles occupent 71 % de la surface totale, et il est donc tout à fait logique qu'elles soient concernées par des collisions qui ont laissé leur empreinte, sinon physique, du moins historique et mythologique, dans l'histoire des peuples du passé.

La thèse du continent perdu dans le Pacifique (Mû ou un autre) a toujours passionné les amateurs de mystère et d'insolite, mais elle n'a jamais pu être confirmée par la science, notamment par les recherches océanographiques qui se sont multipliées depuis une soixantaine d'années. Les fonds océaniques sont bien connus de nos jours, et leur formation et leur renouvellement constant à l'échelle géologique parfaitement explicités. Il est vrai cependant que les énigmes concernant le région restent nombreuses, notamment celles liées à l'origine de l'île de Pâques (16) et que des surprises de taille restent possibles. Ce qui est fort plausible pour le moment, c'est l'impact d'un objet cosmique qui remonterait à 4350 ans et ses diverses conséquences que nous allons examiner.

La collision a pu se produire à l'époque de Yao, l'un des empereurs légendaires de la Chine qui aurait vécu vers 2350 avant notre ère. A son époque, on signale plusieurs catastrophes qui ne seraient en fait que des sous-produits de l'impact. D'abord, un tsunami terrible qui aurait ravagé l'Asie du Sud-est et notamment la Chine, et englouti des îles du Pacifique et même de l'océan Indien. La vague de plusieurs dizaines ou centaines de mètres ("*elle montait jusqu'au ciel* " racontent les légendes) aurait provoqué des inondations terribles. Ces inondations auraient été à la fois d'origine maritime, mais dues également d'autre part à des crues gigantesques, consécutives à des pluies torrentielles.

Nous avons vu plus haut que les collisions océaniques peuvent faire bouillir la mer, du fait de la chaleur engendrée (plusieurs milliers de degrés) et entraîner des quantités énormes de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau se condense en nuages et provoque par la suite des pluies exceptionnelles que l'on peut assimiler à des déluges. Ainsi l'inondation se produit de trois côtés à la fois : de la mer, du ciel et des fleuves gonflés par les pluies diluviennes et qui quittent rapidement leur lit habituel. L'eau ne peut plus s'écouler pendant plusieurs semaines.

Ce cataclysme pourrait être bel et bien lié au Déluge biblique dont j'ai parlé au chapitre 2. Il faut se rappeler l'hypothèse (fausse) de Whiston et de sa comète de 575 ans, qui était contemporaine du Déluge, daté par les théologiens à 2349 ans avant l'ère chrétienne et aussi le fait que Noé aurait pu vivre à la même époque. Coïncidence ou relation de cause à effet ? Les astronomes du XVIII^e siècle se posaient déjà la question, et certains n'étaient pas loin de répondre positivement.

Enfin, si les légendes chinoises de l'époque ont un fond de vraisemblance, il n'est pas exclu que cette partie de l'Asie ait été victime de l'impact de plusieurs fragments mineurs d'un objet plus volumineux, ayant peut-être un rapport avec la désintégration de Hephaistos.

La collision qui a bouleversé l'ordre du monde à la fin du XIII^e siècle avant J.-C.

Deux questions essentielles : quel objet et pourquoi cette date ?

Avec cette collision dont j'ai déjà beaucoup parlé tout au long de ce livre, on arrive à la dernière grande catastrophe d'origine cosmique qu'a subie la Terre. D'autres événements ont été postérieurs à celui-ci, comme par exemple la collision de l'époque de Josué, plus récente de seulement une quarantaine d'années et que j'ai évoquée au chapitre 2, mais aucune n'a pu atteindre l'ampleur de celle-ci qui a eu des répercussions sur au moins trois continents, l'Afrique, l'Asie (dans sa partie occidentale) et l'Europe.

Au chapitre 18, j'ai évoqué les cataclysmes terrestres qui ont eu lieu au II^e millénaire dans le Bassin méditerranéen, pour bien les différencier. L'éruption volcanique du Santorin, notamment, a toujours plus ou moins interféré avec le cataclysme cosmique et de nombreux auteurs l'associent encore aux Plaies d'Égypte et à l'Exode, bien que les époques diffèrent de quatre siècles. Il est exclu que le début de cet Exode des Hébreux se soit passé avant le XIII^e avant J.-C., même si le problème du Pharaon incriminé dans cette histoire, et c'est un élément vraiment important, n'a été définitivement élucidé que durant le dernier quart du XX^e siècle.

Certains égyptologues penchent encore pour Ramsès II (17), mais il s'agit d'un combat d'arrière-garde. Le pharaon de l'Exode est très probablement le treizième fils de Ramsès II, connu sous le nom de Merenptah (et souvent en France sous celui de Mineptah) qui lui a succédé et qui a régné au moins cinq ans et au plus dix ans (de 1213 à 1203 avant J.-C. d'après les Égyptologues modernes). Les dates de règne de ces pharaons qui varient suivant les auteurs, selon qu'ils utilisent la chronologie haute ou la chronologie basse, d'une bonne vingtaine d'années (ainsi pour Ramsès II, la date de sa mort est 1236 avant J.-C. pour certains et 1213 pour d'autres), sont précisées aujourd'hui.

En toute logique, c'est la chronologie basse qui s'impose aujourd'hui pour des raisons astronomiques et historiques (18) et je l'utilise contrairement à ce que j'avais fait en 1982. De ce fait, le cataclysme de -1225 dont je parlais se trouve avancé en -1208 (c'est-à-dire 1209 avant J.-C., date historique qu'il est bon de retenir) (19) pour des raisons que je vais développer.

Les choses ayant sérieusement évolué depuis 1982, je rappelle d'abord rappeler ce que j'écrivais alors (pp. 236-237) pour répondre aux deux questions de base qui se posaient : quel type d'objet et pourquoi cette date ?

" Certains auteurs croient à une comète très importante, mais en fait c'est peu probable pour plusieurs raisons, dont la principale est que les impacts de comètes actives sur la Terre sont des événements *extrêmement rares*, puisqu'il ne s'en produit pas un seul en moyenne par million d'années. Nous penchons plutôt pour un cataclysme "courant" : l'impact d'un EGA cométaire qui s'est fragmenté en plusieurs morceaux et qui a eu tendance à se désagréger et à s'émietter tout au long de sa trajectoire intra-atmosphérique. Nous aurons l'occasion de voir pourquoi.

La date de -1225 résulte principalement de l'examen des textes égyptiens, notamment ceux découverts à Médinet Habou (partie sud de l'ancienne Thèbes occidentale) au XX^e siècle seulement. Ces textes très importants ont été gravés sous le règne de Ramsès III, quelques dizaines d'années seulement après la catastrophe. Ce sont eux qui, seuls, permettent de dater avec précision (à quelques années près, ce qui est fantastique quand on sait le flou des datations anciennes) le cataclysme auquel il font allusion. Ces textes ont permis de cerner la période incriminée, qui ne peut être que celle de Merenptah, ou moins probablement l'un de ses deux successeurs directs. "

Sekhmet, Phaéton, Absinthe, Surt et les autres

Depuis l'écriture de ce texte, il y a eu en effet une nouveauté essentielle : la découverte que P/Encke et Oljato ne formaient qu'un seul objet il y a 9500 ans et qu'ils sont membres de la grande famille de Hephaistos qui comprend un astéroïde aussi gros que Hephaistos (le fragment principal de l'objet originel) qui a 8 ou même 10 km de diamètre moyen. Les astronomes catastrophistes croient que l'objet céleste du XIII^e siècle était *mixte*, à la fois cométaire et astéroïdal, qu'il pouvait être de taille kilométrique, qu'il s'est progressivement disloqué dans l'atmosphère (heureusement !) et qu'il n'a touché le sol que d'une manière partielle, certains fragments ayant pu résister à la traversée de l'atmosphère, d'autres non.

Pour ce qui est de la période incriminée, le mérite en revient essentiellement au théologien et archéologue allemand Jürgen Spanuth (1907-1998) (20) qui a étudié cette période troublée avec beaucoup de pertinence. Cet auteur, à la

recherche après beaucoup d'autres de l'Atlantide, a cherché à démontrer que les fameux *Peuples de la Mer*, dont il est longuement question dans les textes gravés de Médinet Habou, ont été chassés de leur région d'origine (un ancien empire de la côte occidentale du Schleswig-Holstein en Allemagne du Nord, partiellement englouti aujourd'hui dans la mer du Nord, et qui serait l'Atlantide d'après Spanuth) à la suite du cataclysme cosmique de -1208. Spanuth, en se basant sur des calculs du chercheur italien Mario Zanot, imputait ce cataclysme à un passage très rapproché de la comète P/Halley en -1226 et à un impact d'un fragment de cette comète qu'il pensait être Phaéton (rebaptisé, nous l'avons vu, Surt dans la mythologie germanique et nordique), dont la légende transmise par Ovide (voir le texte au chapitre 1) est parvenue jusqu'à nous.

Cette quasi-collision entre la Terre et P/Halley supputée par Zanot et retenue par Spanuth est exclue. Par contre, Phaéton est bien l'un des noms associés à la catastrophe cosmique, avec de nombreux autres dont les plus connus sont Typhon en Grèce, Anat en Syrie, l'étoile de Baal en Canaan (Palestine et Phénicie), Absinthe (l'étoile de l'Apocalypse) chez les Hébreux, Surt dans les pays du nord et surtout Sekhmet en Égypte. Je garderai ce dernier nom, pour continuer l'histoire, car ce sont les textes égyptiens qui, grâce surtout à un passage capital des fresques de Médinet Habou, permettent de démontrer que c'est *un même cataclysme* qui a concerné l'Égypte et les pays du Nord.

" Le feu de Sekhmet a brûlé les pays du neuvième cercle. " (21)

Il faut savoir pour comprendre l'intérêt et l'importance de cette citation que, dans l'Antiquité, la Terre était divisée en neuf cercles parallèles (un dixième concernait l'axe du monde lui-même) et que le neuvième cercle concernait les pays de l'extrême nord de la Terre connus à cette époque (en gros la Suède, la Norvège, le Danemark, l'Allemagne du Nord et aussi l'Islande actuelles).

Spanuth explique dans son livre, en citant des sources de différentes époques, les raisons qui lui permettent de dater (approximativement) la collision et sa relation avec la comète Phaéton, dont il raconte également la légende dans la version de Ovide.

" Il est possible de dater les catastrophes naturelles rapportées par cette légende car il y est dit, par exemple, que "*la Libye devint un désert*" et que, parmi de nombreux autres fleuves, "*le Nil fut mis à sec*".

Ces deux événements ne sont rapportés qu'une seule fois dans les textes de l'ancienne Égypte. Dans l'inscription de Karnak on trouve, pour la cinquième année du règne de Merenptah (1232-1222 avant J.-C.) : "*La Libye est devenue un désert infertile, les Libyens viennent en Égypte pour chercher la nourriture de leur corps*" (Hölscher, 1937).

Ramsès III rapporte, dans les textes de Médinet Habou : "*La Libye est devenue un désert, une redoutable torche lança les flammes du ciel pour détruire leurs armes et pour ravager leur pays... Leurs os brûlent et grillent dans leurs membres*".

Il est dit également dans les textes de Médinet Habou que le Nil aurait été asséché. On y lit entre autres : "*Le Nil était asséché et le pays était livré à la sécheresse*" (tableau 105)...

Dans les textes de Shéti II (vers 1215-1210 av. J.-C.), on trouve : "*Sekhmet était une étoile qui tournait en lançant des flammes, une gerbe de feu tempétueuse*" (Breasted, *Ancient Records of Egypt*, 1906-07).

Dans une inscription de Ougarit (Ras Shamra) datée de l'époque qui précéda de peu la destruction de la ville au cours du derniers tiers du XIII^e siècle avant J.-C., on trouve "*L'étoile Anat est tombée du ciel, elle a massacré la population du pays syrien et elle a inverti le crépuscule ainsi que la position des étoiles*" (Bellamy, 1938). " (22)

Une citation retenue par Spanuth contient une information capitale qui permet de situer le cataclysme dans une fourchette étroite : *La collision se serait passée lors de la cinquième année du règne de Merenptah, soit l'année 1209 avant J.-C.* si l'on utilise la chronologie basse (Spanuth, lui, utilise la chronologie haute (23), comme on le faisait généralement dans les années 1970). Cette année 1209 peut en fait s'écarter de quelques années de la réalité, car les dates de règne de Merenptah ne sont qu'approximatives. Si l'on en croit les Égyptologues modernes, Merenptah aurait eu pour successeurs directs : Amenmès (1203-1200) et Séthi II (1200-1194). Or ce dernier a laissé le texte rappelé ci-dessus et est donc obligatoirement postérieur au cataclysme. Plus loin, j'essaie de préciser la date de l'impact de Sekhmet, événement majeur de l'histoire cosmique des hommes.

La trajectoire de Sekhmet et les conséquences du cataclysme

Peut-on essayer de reconstituer l'orbite intra-atmosphérique de Sekhmet, qui était considéré par les auteurs de l'Antiquité soit comme une comète (le plus souvent), une étoile, une boule de feu, un nœud de flammes, un deuxième soleil, un serpent ou un dragon ? A mon avis, c'est très possible, car les traces de son passage sont nombreuses dans les textes des Anciens. Sekhmet venait de l'océan Indien et suivait une trajectoire sud-est/nord-ouest. Première chose quasi certaine : *la collision a eu lieu de jour.*

On signale d'abord son passage en Éthiopie et en Arabie. Apparemment, l'objet cosmique, qui a probablement subi une première fragmentation partielle en traversant les hautes couches de l'atmosphère, continue de se disloquer, de s'émietter et perd une partie substantielle de sa matière, probablement de couleur rouge, puisque c'est à cette époque que l'Érythrée

et la mer Rouge vont recevoir leur nom. Les morceaux de Sekhmet, qui a déjà la forme d'un "dragon" du fait qu'il est suivi d'une épaisse et longue traînée de poussières, s'écartent un peu les uns des autres grâce à "l'effet fusée". L'un de ceux-ci explose au-dessus de la Libye (qui devient définitivement désertique seulement à cette époque) et un autre au-dessus de la Syrie (qui est victime d'incendies gigantesques). Un troisième fragment tombe peut-être dans la Méditerranée (*c'est l'épisode biblique du "puits de l'abîme"*), un impact suivi d'une éruption) et cause des séismes et un tsunami.

Mais le corps principal continue sa route vers le nord-ouest, passe au-dessus de la Grèce, brûlant plusieurs régions, détruisant de nombreux palais et entraînant en définitive la disparition de la culture mycénienne. On perd alors sa trace, mais en fait Sekhmet survole l'Europe centrale (où les Celtes et d'autres peuples sont des témoins effrayés qui conserveront une peur panique, quasi malade, des dangers venant du cosmos), puis l'Allemagne du Nord et le sud de la Scandinavie (*c'est l'épisode du Ragnarök* rappelé au chapitre 1, avec Surt arrivant du sud avec les Géants du feu), avant d'exploser ou de heurter l'océan Atlantique ou la mer du Nord. Cet impact final pourrait avoir été multiple, si les Géants du feu de la légende constituaient de nouveaux fragments de l'objet principal.

On ne peut savoir avec exactitude si finalement il y a eu explosion dans l'atmosphère ou impact océanique. Il faut rappeler ici ce que j'ai expliqué au chapitre consacré aux comètes. La ceinture de Kuiper est composée de milliards d'objets de nature hétéroclite que les astronomes appellent des *objets de Kuiper* (ou KBO pour *Kuiper Belt Objects*). Beaucoup sont des *comètes* formées quasi exclusivement de glace et de poussières très grossièrement agglutinées. D'autres sont des astéroïdes rocheux, d'autres sont des objets mixtes. Il n'est même pas tout à fait exclu que certains gros objets soient différenciés, avec donc la possibilité d'un noyau ferreux et nickélicifère.

Si l'objet de -1208, probablement issu de Hephaistos et autonome depuis seulement quelques milliers d'années, était un fragment cométaire (genre P/Encke), je ne crois pas qu'il y ait pu avoir un impact terrestre (ou océanique bien sûr). Par contre, il reste possible que le dernier fragment qui a survolé l'Europe du nord pouvait être partiellement rocheux, et donc avoir une densité supérieure (de l'ordre de 3,0 g/cm³ peut-être), dans quel cas ce bloc, ou seulement une partie de celui-ci, aurait pu percuter l'océan.

Quoi qu'il en soit, et même s'il y a eu seulement désintégration dans l'atmosphère au stade final, il est quasiment sûr qu'un gigantesque tsunami se forme et revient vers l'Europe. C'est lui qui balaie "l'empire englouti de la mer du Nord" cher à Spanuth, peut-être à la suite d'un bouleversement isostatique post-impact (la région se serait enfoncée soudainement de dix mètres d'après certains géologues) et qui pousse les Peuples du Nord (qui deviendront bientôt une composante des Peuples de la Mer) à un exil forcé vers le sud de l'Europe, comme le racontent si bien les prisonniers de

Ramsès III, dessinés d'une manière très précise, sur les fresques de Médinet Habou. L'épopée du *Ragnarök* a conservé tous ces divers stades du drame cosmique (et surtout *humain*), qui ont été transmis par la suite de génération en génération.

Le fait que cette orbite intra-atmosphérique soit possible, et il suffit de regarder un atlas pour s'en persuader, est très important, car une mauvaise répartition des zones géographiques sinistrées exclurait une catastrophe unique. Pourtant, une telle catastrophe *unique* est probable, car les récits de catastrophes transmis par les Anciens se rapportent réellement à *une même époque*.

L'hypothèse de la comète active, du noyau de comète, ou de l'objet mixte permet d'expliquer assez bien les diverses conséquences associées à Sekhmet. L'extrême chaleur constatée serait due à l'échauffement progressif du corps céleste (qui aurait atteint plusieurs milliers de degrés) et aussi à la formidable onde de choc qui l'accompagnait et qui aurait créé des désordres atmosphériques sérieux (ouragans, etc.). Le bruit infernal, les séismes, les explosions, les ténèbres, les incendies gigantesques, les tsunamis, le tarissement et l'empoisonnement des fleuves (le Nil fut asséché d'après Ovide) s'expliquent fort bien, de même que le "monde rouge" qui a tant étonné les Anciens.

Les multiples mouvements de populations constatés en cette fin de XIII^e siècle et dans le premier quart du XII^e avant J.-C. s'expliquent également. Ces peuples furent conduits à l'exil parce que *leurs ressources naturelles habituelles étaient détruites ou empoisonnées*, la géographie chamboulée. Pour survivre, il fallait partir ailleurs, quitter sa région, souvent sans espoir de retour, et automatiquement se frotter aux autochtones qui voyaient d'un mauvais œil des étrangers émigrer sur leurs terres. De tels exodes massifs débouchent obligatoirement sur la guerre et sur une refonte des sociétés humaines. Tout cela est observé entre -1208 et -1180. En une seule génération souvent, on note des transformations inexplicables si on ne prend pas en compte les conséquences du drame cosmique. Comme l'ont si bien dit les Égyptiens du temps de Ramsès III, une trentaine d'années seulement après le cataclysme, et dont beaucoup avaient été les témoins oculaires :

" Sekhmet a bouleversé l'ordre du monde. " (24)

Après le passage de l'objet cosmique et les conséquences terrestres et humaines qu'il a engendrées, aucune des anciennes civilisations sinistrées ne survécut sans des remaniements profonds. L'événement a été si exceptionnel pour les populations, surtout pour les Égyptiens d'ailleurs, que Pline s'en est fait encore l'écho treize siècles plus tard, avec l'évocation de "la comète terrible".

Cet événement est pourtant totalement passé sous silence dans les livres sur l'Antiquité, car les historiens du passé et ceux de la génération actuelle n'ont jamais pris en compte le cataclysme dans leurs travaux, faute de documents

suffisamment explicites laissés par les Anciens. C'est pourquoi *l'histoire ancienne devra être réécrite* à la lumière des cataclysmes mis en évidence par les chercheurs actuels. Cela ne pourra se faire que par une nouvelle génération d'historiens.

Peut-on dater la collision avec précision ?

Il est aujourd'hui possible de proposer quelques dates pour le cataclysme cosmique, bien que la double chronologie pour les pharaons complique singulièrement le problème, puisque les dates varient dans une fourchette de 22 ans pour la mort de Ramsès II (1235 et 1213 avant J.-C.) et pour celle de Merenptah (1225 et 1203 avant J.-C.). Certains textes égyptiens précisent que le cataclysme a eu lieu un *12 Tybi*, ce qui correspond à une date de fin octobre et début novembre de notre calendrier moderne.

La légende de Phaéton, version Ovide, et le passage de l'Apocalypse traitant du *puits de l'abîme* permettent d'obtenir la date dite *volcanologique*. Ovide nous apprend que suite à la chute de Phaéton, l'Etna eut une éruption très importante. Le passage de l'Apocalypse précise que suite à la chute d'une étoile sur la Terre (*Il lui fut donné la clé de l'abîme*), il y eut une éruption (*Elle ouvrit le puits de l'abîme*). Les volcanologues modernes ont donné une indication intéressante : une éruption de l'Etna, encore décelable malgré que ses dépôts soient recouverts par ceux de multiples éruptions ultérieures, date de 1227 avant J.-C. (à quelques années près).

Je propose donc une première date : 5 novembre 1227 avant J.-C. (= -1226). Deux dates peuvent être proposées concernant Merenptah, puisque les textes égyptiens disent que le cataclysme eut lieu la *cinquième année* de son règne. Dans la chronologie haute, la date est le 5 novembre 1230 avant J.-C. (= -1229) et dans la basse le 31 octobre 1209 avant J.-C. (= -1208). D'autres auteurs donnent 1232-1222 pour le règne de Merenptah, la cinquième année tombe alors en parfait accord avec la date volcanologique (simple coïncidence ou datation inespérée grâce à Ovide ?). Malgré tout, la date basse de -1208 (1209 avant J.-C.) me semble préférable, du fait des dates de Merenptah mises en avant par plusieurs générations d'Égyptologues. Mais évidemment ces dates restent approximatives et devront peut-être être ajustées quand on connaîtra les dates exactes de règne des pharaons qui peuvent avoir été concernés par l'impact de Sekhmet.

Sekhmet et l'Exode

Dans le cadre étroit de ce chapitre, je ne peux m'appesantir trop longtemps sur l'impact de -1208 (il faudrait un livre entier pour être complet et citer tous les textes et les conséquences qui lui sont associés), mais je dois dire quelques mots sur *l'Exode des Hébreux* qui se situe probablement à la même époque. La majorité des théologiens et des spécialistes de la Bible sont d'accord, en effet, pour considérer que Merenptah était le pharaon de triste mémoire qui persécuta les Juifs et les poussa à la rébellion et à l'Exode.

Certaines des *dix plaies* trouvent naturellement leur place suite à la catastrophe cosmique de -1208. Particulièrement, les plaies 1 (l'eau changée en sang du fait de la pigmentation rouge des poussières issues du corps céleste), 5 (la peste du bétail), 6 (les ulcères), 7 (le tonnerre et la grêle) et 9 (les ténèbres) sont des conséquences "normales" de l'explosion d'une comète ou d'un astéroïde d'origine cométaire.

On sait d'après *la Bible* qu'il y a eu probablement un nombre accru de cancers de la peau et de brûlures à cette époque (" *Leurs os brûlent et grillent dans leurs membres* ", rappellent les textes), ils s'expliquent fort bien par les radiations associées à l'explosion et à l'augmentation de la radioactivité au niveau régional. On l'a constaté avec l'explosion de la Toungouska qui était probablement un cataclysme analogue, peut-être même causé par une matière identique si l'origine des deux objets est la même, mais d'une amplitude beaucoup moins forte. L'objet de la Toungouska ne dépassait pas 100 mètres de diamètre, alors que Sekhmet était sans doute de taille kilométrique avant sa première fragmentation.

Pour ce qui est du *Passage*, voilà ce que j'écrivais en 1982 (p. 242) dans la version originale de *La Terre bombardée* :

" Quant au fameux *Passage*, où qu'il ait eu lieu, car les avis ont toujours divergé (mer Rouge, mer des Roseaux, etc.), il a dû avoir lieu quelques jours après la collision de Sekhmet, pendant la période "post-catastrophe" quand les ouragans faisaient encore rage et quand la vie normale n'avait pas encore retrouvé tous ses droits. Ce *Passage* s'explique obligatoirement par le retrait provisoire de la mer, avant son retour furieux sous la forme d'un tsunami ou d'une trombe d'eau. Que les Juifs aient profité de la confusion générale associée à cette période particulièrement troublée, il n'y a rien là d'in vraisemblable. On comprend même que principaux bénéficiaires (peut-être les seuls en fait) du cataclysme cosmique, ils se soient considérés comme le "peuple élu". Les théologiens, avec cette nouvelle hypothèse assez vraisemblable, pourront sans doute améliorer la théorie de l'Exode qui laissait pour le moins à désirer jusqu'à maintenant. Sekhmet leur ouvre une voie nouvelle. "

Je serai moins affirmatif aujourd'hui, mais aussi plus précis, pour les raisons suivantes. Au chapitre 1, j'ai rappelé un texte égyptien qui précise que le cataclysme a eu lieu un *12 Tybi*, date qui correspond au *31 octobre 1209 avant J.-C.* (soit le 31 octobre -1208), si la catastrophe a bien eu lieu cette année-là, date qu'il sera peut-être nécessaire d'ajuster quelque peu (25), mais relativement assez proche de la réalité.

On sait, par contre, par les textes hébreux que le *Passage* a eu lieu au début du printemps, au mois de mars, période plus tardive de quatre à cinq mois environ du cataclysme cosmique responsable des *Plaies* et de la période

d'incertitude qui a poussé les Juifs à l'Exode. Quatre questions se posent donc concernant cet important épisode biblique :

1. La date du 12 Tybi correspond-elle à la catastrophe de -1208, ou bien à une autre catastrophe antérieure ? (on sait qu'il y en a eu d'autres durant les millénaires précédents).

2. L'intervalle de quatre ou cinq mois pourrait avoir été marqué par les plaies qui ont d'abord agacé, puis fait peur aux Égyptiens et les ont décidé à laisser partir les Hébreux sous la direction de Moïse. On pourrait alors expliquer partiellement *la mort des nouveau-nés* (qui a toujours paru inexplicable), qui ne serait en fait que la conséquence d'*un empoisonnement des fœtus* dû à une radioactivité résiduelle mais bien réelle, et qui aurait ainsi entraîné *la non-viabilité* ou *l'anormalité* de ces nouveau-nés "post-catastrophe" ou des accouchements prématurés ou des avortements suspects. Mais est-ce vraiment crédible ? (Je rappelle que Tchernobyl, pour d'autres raisons, a montré qu'une forte radioactivité n'avait rien de bon pour les femmes enceintes et surtout pour leur descendance).

3. Peut-on croire que la période post-catastrophe en Égypte ait duré près de six mois ? Quand on lit *la Bible*, on se rend bien compte qu'il a fallu un certain temps à Pharaon pour se décider et qu'il est resté sourd avant de répondre affirmativement à la demande de départ des Hébreux. Et d'autre part, le cataclysme cosmique et l'Exode ne peuvent pas être tout à fait concomitants. Si le pays était totalement détruit, il paraît évident que le pharaon avait autre chose à faire en urgence, plutôt que de lever une armée et aller courir après des pseudo-ennemis qui pouvaient bien attendre. En fait, l'écart de plusieurs mois entre les deux événements paraît probable (il pourrait même se chiffrer en années, si Merenptah a vraiment régné dix ans et non seulement six). Par contre, comment expliquer alors le tsunami ou la trombe d'eau qui a "ouvert" la mer des Roseaux, point de passage le moins large, et donc le plus probable ?

4. Quel était donc le pharaon de l'Exode qui permet de dater avec précision l'épisode du Passage ? On a la réponse aujourd'hui d'une manière quasi certaine : c'était bel et bien Merenptah, comme l'a montré brillamment Maurice Bucaille (1920-1998) (26). Cet érudit, chirurgien de profession et spécialiste des Écritures saintes, s'est demandé dans les années 1970 si l'on ne pourrait pas tenter d'obtenir des signes directs de la participation d'un pharaon à l'Exode. Il a eu l'idée (qui rappelle celle de Luis Alvarez pour l'iridium) d'autopsier les momies de différents pharaons de l'époque qui sont conservées en Égypte depuis plus de 3000 ans et aussi la chance de pouvoir effectuer ces examens extraordinaires (27). Le résultat est sans appel : Ramsès II est exclu, c'était un vieillard invalide à la fin de sa vie ; par contre Merenptah est décédé de mort violente, avec notamment un sérieux traumatisme crânien. Tout porte à croire qu'il est mort durant l'Exode et que *son corps a été récupéré* et aussitôt embaumé. La momie de Merenptah ne fut retrouvée qu'en 1898 et identifiée comme étant la sienne en 1907 seulement. C'est le fait même qu'on l'ait retrouvée qui fit croire à une

majorité d'Égyptologues et de théologiens du XX^e siècle que Merenptah ne pouvait pas être le pharaon de l'Exode, supposé mort noyé durant le Passage. Noyé peut-être, mais récupéré sûrement !

L'impact cosmique de l'époque de Josué

J'ai déjà abordé ce cataclysme au chapitre 2 concernant les textes et les légendes bibliques. Je l'aborde ici d'une manière historique, puisqu'il trouve normalement sa place dans la liste des collisions cosmiques ayant affecté la Terre depuis 13 000 ans.

Cet événement est intéressant, bien qu'il n'ait pas eu l'importance des catastrophes plus anciennes que j'ai passées en revue. Les textes bibliques associent (involontairement en fait, car les compilateurs du texte qui nous est parvenu n'ont jamais fait la liaison génétique entre les deux événements) le *pseudo-miracle de Josué* (l'arrêt du Soleil) et la chute de pierres qui décima les ennemis d'Israël (relire les textes au chapitre 2). Cet impact cosmique qui a eu lieu, d'après *la Bible*, 40 ans après le précédent qui datait de l'époque de Moïse, s'explique beaucoup mieux aujourd'hui à la lumière de l'hypothèse Hephæistos. En effet, cette succession de deux cataclysmes quasiment dans la même région à 40 ans d'intervalle paraissait pour le moins suspecte (et même invraisemblable) aux spécialistes de l'impactisme et semblait fort difficile à expliquer. Comme quoi, il faut croire (partiellement) aux textes des Anciens, les données scientifiques finissent quelquefois à les expliquer d'une façon satisfaisante.

Je rappelle d'abord ce que représente le *Complexe des Taurides*, comme l'appellent les astronomes, pour bien comprendre cet événement. Il s'agit de multiples essaims d'objets astéroïdaux et cométaires, de météoroïdes et de poussières qui circulent sur des orbites relativement similaires et qui sont les débris d'un objet unique, l'ancien centaure Hephæistos, qui a été introduit dans le Système solaire intérieur, il y a quelques dizaines de milliers d'années, à la suite de perturbations planétaires.

Ce gros objet a été ensuite brisé en d'innombrables fragments, en plusieurs épisodes successifs, ce qui a entraîné une dispersion importante de la matière originelle. Toute cette matière hétéroclite partage la même route (une route assez large quand même du fait de l'accumulation des diverses perturbations), et parfois certains fragments entrent en collision avec une planète, quand ils se retrouvent au même moment à un point de croisement commun. Pour l'essaim des Taurides, qui est plus spécialement lié à la comète P/Encke, dont la période de révolution est de 3,3 ans (28), la rencontre avec la Terre peut se produire toutes les trois révolutions : $3,3 \text{ ans} \times 3 = 10 \text{ ans}$. Tous les dix ans (aux perturbations près), la Terre est donc davantage menacée par un impact qui peut être d'importance très variable.

Cela s'est produit en -1208 (à quelques années près) et aurait pu se reproduire avec un décalage de dix ans en -1198, en -1188 ou en -1178. La rencontre s'est apparemment reproduite au quatrième croisement (29)

en -1168, et cet événement ne peut pas choquer les astronomes, s'il s'agit d'un fragment réellement originaire du *Complexe des Taurides*. Rappelons aussi qu'au XX^e siècle, la collision de la Toungouska a été probablement une catastrophe du même type, peut-être même avec la même matière originelle, mais différente quand même dans la mesure où en 1908 il n'y a pas eu de chute de pierres, mais désintégration totale dans l'atmosphère de l'objet cosmique.

Pour en revenir à l'époque de Josué, il y a eu donc probablement explosion dans l'atmosphère d'un fragment cométaire (de taille décamétrique ou hectométrique). La diffusion des poussières issues de la désintégration a permis une prolongation inhabituelle du jour tout à fait anormale et donc considérée comme "miraculeuse" pour les témoins oculaires, comme je l'ai raconté au chapitre 2. Par une chance inouïe (et sans doute un peu "arrangée" par les auteurs du texte original), une chute de pierres a pulvérisé les ennemis d'Israël. Cela montre que le fragment en question était partiellement rocheux et non constitué en totalité de glace et de poussières agglomérées. Mais il n'y a rien là d'anormal, vu l'hétérogénéité du corps céleste originel.

Seule l'existence du texte biblique a permis de recenser cet événement, probablement secondaire sur le plan énergétique et au niveau des dégâts réels engendrés par l'explosion. Quelques vies humaines peut-être, qui se sont transformées pour les besoins de la cause en une armée "sélectionnée" par Dieu, et en un fait d'armes à transmettre aux générations futures pour bien montrer la puissance du Créateur. Plus scientifiquement, en résumé, un événement d'origine cosmique *ordinaire*, comme la Terre dans sa totalité a dû en compter *plusieurs dizaines* depuis 20 000 ans, mais qui restent, eux, inconnus faute de témoignages humains et de textes les ayant relatés et datés avec précision.

L'impact de Chiemgau en Bavière

Depuis quelques années, il est question d'un sérieux impact qui s'est produit en Bavière dans la région de Chiemgau (30/31). L'objet responsable, connu sous le nom de *Chiemgau comet*, qui pouvait avoir plusieurs centaines de mètres de diamètre en entrant dans l'atmosphère, venait du nord-est. Il a explosé à 70 km d'altitude et s'est fragmenté en de nombreux fragments qui ont généré 80 cratères dans une vaste zone de 58 km x 27 km entre Salzburg et Munich. Ces cratères ont entre quelques mètres de diamètre pour les plus petits et plusieurs centaines de mètres pour les plus grands, avec un cratère majeur de 600 mètres, occupé aujourd'hui par le lac Chiemsee. Les prochaines années vont préciser toutes ces données.

L'impact avec la comète se serait produit au V^e siècle avant J.-C. On parle d'une date voisine de -465 d'après certaines données historiques. De très nombreuses traces archéologiques ont été trouvées dans la région, ce qui indique une population déjà relativement nombreuse. Les peuples locaux étaient des tribus celtes. Certains chercheurs se demandent donc si cette

catastrophe cosmique n'a pas eu d'incidence sur la fameuse peur chronique, quasi malade, des Celtes, puis des Gaulois, que le ciel leur tombe sur la tête. Toutatis a peut-être fait son entrée dans la mythologie celtique à la suite de cet impact.

Quelques autres collisions possibles et non datées

J'ai retenu dans ce chapitre sept cataclysmes importants probables depuis 13 000 ans, mais il est certain que quelques autres, plus ou moins importants, ont eu lieu également. Je signale que seulement deux impacts océaniques probables sont recensés, alors qu'ils doivent se produire dans une proportion de 7 sur 10. On voit qu'il y a un important déficit statistique. Récemment, deux hypothèses d'impacts océaniques ont été proposées (32), mais elles sont évidemment contestées par la communauté scientifique.

La première est celle de la géologue américaine Dallas Abbott. D'après cette scientifique, un astéroïde de 1 km de diamètre aurait percuté la Terre dans l'océan Indien autour de -2800. Cet impact océanique aurait provoqué un tsunami géant, avec des vagues de 200 mètres de haut qui auraient ravagé les côtes alentour, notamment celles de Madagascar où l'on trouverait encore des traces suspectes, sous forme de dépôts sédimentaires en forme de V et baptisés "chevrons" par les spécialistes. On recherche actuellement le cratère sous-marin qui pourrait être associé à cet impact océanique. Ce cataclysme pourrait être l'impact maritime responsable du Déluge biblique.

La seconde hypothèse est celle de la géologue française Marie-Agnès Courty. D'après cette spécialiste, un impact majeur (là encore un astéroïde de taille kilométrique) aurait eu lieu autour de -2000 dans l'océan Antarctique. Sous le choc, une multitude de fragments arrachés aux fonds marins auraient été projetés dans l'espace et seraient retombés dans de nombreux sites terrestres, notamment en Syrie (?) où ils sont encore décelables.

Il faudra attendre pour avoir la confirmation ou l'infirmité de ces deux impacts. Les scientifiques exigent des preuves et le scepticisme semble de rigueur dans la communauté scientifique. Pour les astronomes spécialisés, par contre, ces impacts n'ont rien d'in vraisemblables. Une chose est sûre : la fréquence des impacts longtemps retenue (jusqu'en 1995) est totalement obsolète depuis que l'on découvre des PHA (*Potentially Hazardous Asteroids*) par centaines. Le millier d'années est l'échelle acceptable pour un impact d'envergure, certainement pas la centaine de milliers d'années. Mais il faut savoir que les objets d'origine cométaire sont fragiles et la fragmentation est la règle. Les traces ne sont pas obligatoirement détectables s'il y a désintégration dans l'atmosphère. Les cratères météoritiques n'existent pas toujours ou peuvent être rapidement gommés par la sédimentation s'ils sont océaniques.

Actuellement, on ne peut ni dater, ni situer géographiquement, quelques autres cataclysmes d'origine cosmique hypothétiques. A quelles catastrophes

correspondent les légendes d'Amérique du Nord, d'Amérique centrale, d'Amérique du Sud et du nord-est de l'Asie ? En Inde également, plusieurs allusions concernant la chute d'étoiles et de météorites meurtrières figurent dans les livres sacrés. Chez les Indiens Parsis, c'est l'étoile Tistrya qui aurait causer à la fois un incendie de grande envergure et un déluge, ce qui semble contradictoire à première vue. Le mystère reste total aujourd'hui sur la cause réelle et la date de ces catastrophes.

Combien d'entre elles peuvent être reliées à des fragments de Hephaistos qui auraient percuté la Terre ? Il ne faut pas oublier qu'un astéroïde comme Oljato, membre de cette grande famille cosmique, est sur une orbite de quasi-collision avec notre planète alors que sa sœur jumelle, P/Encke, ne l'est pas. L'avenir réserve de belles surprises.

Dans son livre *Les mystères des mondes oubliés*, Charles Berlitz (1914-2003) (33) cite des extraits de plusieurs livres classiques de l'Inde concernant une mystérieuse "météorite de fer". Plusieurs auteurs, spécialistes des ovnis et des civilisations "supérieures" disparues, ont également utilisé ces textes pour faire de cet objet céleste un missile ou un ovni. Mais les textes sont clairs, ce qu'ils décrivent, c'est une météorite de fer qui provoqua un "feu du ciel" qui marqua profondément les esprits des témoins.

" ... Un projectile unique chargé de toute la puissance de l'univers. Une colonne incandescente de fumée et de flammes, aussi lumineuse que dix mille soleils, s'éleva dans toute sa splendeur... C'était une arme inconnue, une météorite de fer, un gigantesque messenger de mort qui réduisit en cendres la race entière des Vrishnis et des Andhakas... Les cadavres étaient à ce point brûlés qu'ils étaient méconnaissables. Leurs cheveux et leurs ongles tombaient d'eux-mêmes ; les poteries se brisaient sans cause apparente, et les oiseaux devenaient blancs. Après quelques heures, tous les aliments étaient contaminés... Pour échapper à ce feu, les soldats se précipitèrent dans les cours d'eau...

... Une météorite de fer, par laquelle tous les individus de la race des Vrishnis et des Andhakas furent réduits en cendres... une cruelle météorite de fer qui ressemblait à un gigantesque messenger de mort... Le roi fit réduire en fine poudre cette météorite de fer... les hommes s'employèrent à projeter cette poudre dans la mer... "

Ces quelques extraits parvenus jusqu'à nous à travers les siècles montrent qu'en Inde aussi des tribus furent brûlées et détruites par les conséquences directes d'un impact. Étonnamment, celui décrit ci-dessus concernait une sidérite. Or ces sidérites sont des météorites plutôt rares, bien qu'elles soient relativement nombreuses dans nos collections. Le fait que dans les vieux textes indiens, le roi de l'époque fit réduire en poudre une partie de la météorite signifie que la volatilisation ne fut pas complète au moment de

l'impact, et donc qu'il ne pouvait s'agir d'un objet de plusieurs dizaines de mètres.

Mais les calculs montrent qu'un petit astéroïde de 10 mètres seulement a une masse de l'ordre de 4000 tonnes et une énergie cinétique voisine de 5×10^{14} joules au moment de l'impact. C'est l'énergie libérée par un séisme de magnitude 6,6, donc une énergie supérieure à celle libérée par la bombe atomique de Hiroshima (magnitude 6,4). Un astéroïde minuscule est capable de causer des dégâts considérables, s'il résiste à la fragmentation en traversant l'atmosphère. Les sidérites sont plus résistantes à cet égard et ont de meilleures chances de franchir intactes le bouclier atmosphérique. Même minuscule, la sidérite indienne a exterminé (pas directement, mais par les conséquences que l'impact a engendrées, notamment la chaleur extrême et les *brûlures*) deux tribus entières, si l'on en croit les textes.

Les philosophes de l'Antiquité étaient catégoriques à cet égard, la fin du monde par l'eau et par le feu était la règle. Ils avaient raison et leur perspicacité n'avait rien à envier à celle des savants d'aujourd'hui. Il aura fallu attendre deux millénaires pour pratiquement revenir au point de départ, à savoir que le cosmos reste une menace permanente pour la Terre, pour les hommes et plus encore pour les civilisations.

Notes

1. I. Donnelly, *The destruction of Atlantis - Ragnarok, or the age of fire and gravel* (Courier Dover Publications, 2004). Le livre d'Ignatius Donnelly a constamment été réédité au XX^e siècle. Souvent descendu en flèche par les scientifiques, il n'en est pas moins fort intéressant. Donnelly, digne successeur des grands catastrophistes du début du siècle, a compris que seule une comète pouvait avoir entraîné les désastres qu'il décrit dans son livre, à une époque (le livre a été publié en 1883) où aucun NEA n'était connu, ni même soupçonné (Eros n'a été découvert qu'en 1898).

2. J. Hawkes, *Atlas culturel de la préhistoire et de l'antiquité* (Elsevier-Séquoia, 1978). Titre original : *The atlas of early man* (1976). Un autre livre traite le même sujet : M. Oliphant, *L'atlas du monde antique* (Solar, 1993). Titre original : *The atlas of the ancient world* (1992).

3. V. Clube and B. Napier, *The cosmic serpent* (Faber & Faber, 1982) et *The cosmic winter* (Blackwell, 1990). Ce second livre est paru en français en mars 2006 sous le titre *Hiver cosmique*. Seize ans plus tard, il ne pouvait être question de l'actualiser.

4. J.-L. Bernard, *Les archives de l'insolite* (Livre de Poche, 1978).

5. Quatre scientifiques américains étaient associés pour l'organisation de cette importante conférence, patronnée par l'*American Geophysical Union* (AGU) : Richard Firestone, James Kennett, Allen West et Luann Becker. Une partie des débats ont été filmés et sont consultables sur Internet. La

traduction française est extraite d'un article intitulé : " *Le résultat de l'impact du Dryas récent et les cycles de catastrophes cosmiques - les climatologues se réveillent* ", consultable sur le site www.quantumfuture.net/fr/.

6. F. Hibben, *The lost Americans* (Crowell Company, 1968). Frank Hibben, archéologue et anthropologue américain, est surtout connu pour avoir étudié très en détail les sites de la civilisation de Clovis, la première culture américaine, décimée après le *Younger Dryas Event*.

7. I. Velikovsky, *Les grands bouleversements terrestres* (Le Jardin des Livres, 2004). La version originale est parue sous le titre *Earth in upheaval* en 1955. Bien que décrié, ce livre est fort intéressant. Velikovsky détaille bien les événements liés au *Younger Dryas Event* et publie plus d'une centaine de citations sur le sujet glanées dans les livres et travaux scientifiques de la première moitié du XX^e siècle.

8. R.B. Firestone et al. (25 co-auteurs), *Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 104, n° 41, pp. 16016-16021, 2007. Ce très important article est un résumé des travaux effectués lors de la conférence d'Acapulco en mai 2007. Pas moins de 26 chercheurs de nationalités diverses l'ont cosigné. En fait, c'est l'article fondateur de la nouvelle théorie catastrophiste concernant le *Younger Dryas Event* et son association avec l'extinction du Pléistocène.

9. P.J. Cannon, *Meteorite impact crater discovered in central Alaska with Landsat imagery*, *Science*, 196, pp. 1322-1323, 1977.

10. O.H. Muck, *L'Atlantide. Légendes et réalité* (Plon, 1982). Titre original : *Alles uber Atlantis* (1976). Otto Muck (1892-1956) a écrit ce livre au début des années 1950, peu après celui de Velikovsky. C'était un ingénieur de haut niveau à qui l'on doit plus de 2000 brevets.

11. W. von Engelhardt, *Impact structures in Europe*, dans *International Geological Congress, 24th session, section 15 : Planetology*, pp. 90-111, 1972.

12. G. Kolpaktchy, *Livre des Morts des anciens Egyptiens* (Stock, 1978). Voir aussi sur le même sujet : M. Delclos et J.-L. Caradeau, *Le Livre des Morts égyptien décrypté* (Editions Trajectoire, 2007).

13. A. Slosman, *La grande hypothèse* (Robert Laffont, 1992, avec la collaboration de E. Bellecour). Albert Slosman (1925-1981) était un remarquable érudit qui a travaillé de nombreuses années sur une " *Histoire du monothéisme des origines à la fin du monde* ", œuvre restée inachevée. Voir aussi : J.-L. Bernard, *Aux origines de l'Égypte* (Robert Laffont, 1976).

14. Pour ce qui est des soi-disant *cyclopes*, je rappelle qu'il s'agissait en fait de crânes de mammoths découverts dans certaines grottes de Sicile, et qui furent parfois considérés dans l'Antiquité, un peu abusivement, comme des crânes de géants humains avec un œil frontal unique.

15. M. Déribéré et P. Déribéré, *Histoire mondiale du déluge* (Robert Laffont, 1978).

16. F. Kowaks, *Le dossier secret de l'île de Pâques* (Belfond, 1979).

17. Christiane Desroches-Noblecourt (1913-2011) et Christian Jacq entre autres, croient pour que Ramsès II a été le pharaon de l'Exode, qu'ils voient plus tôt dans l'histoire de l'Égypte. Nicolas Grimal ne prend pas position mais entrevoit les deux possibilités. Le premier égyptologue qui associa Merenptah à l'Exode fut l'Allemand Karl Richard Lepsius (1810-1884) dans son livre *Die chronologie der Aegypter* paru en 1849.

18. L'existence d'une double chronologie pour les pharaons s'explique de la façon suivante. Le lever héliaque de Sirius qui, seul, permet une *datation absolue* a été observé à l'époque de Amenhotep I au XVI^e siècle avant J.-C. comme le raconte le Papyrus Ebers. Mais on ignore si cette observation a été faite à Memphis, capitale de l'Égypte sous l'Ancien Empire, qui se trouvait à 35 km au sud du Caire, ou à Thèbes, capitale sous le Moyen et Nouvel Empire, qui se trouvait beaucoup plus au sud, à 700 km du Caire. Ce n'est pas du tout la même chose et la distance entre les deux villes, supérieure à 650 km, correspond à une différence de 20 ans dans l'apparition du lever de Sirius. Comme le XVI^e siècle correspond au Moyen Empire, les égyptologues modernes, contrairement aux anciens, pensent que l'observation décisive a été faite de Thèbes, qui était la capitale à cette époque. La chronologie basse, même si elle n'est pas certaine, est donc nettement la plus probable.

19. Je rappelle la différence entre les années *astronomiques* et les années *historiques* avant l'ère chrétienne. Elle vient du fait qu'il n'y a pas eu d'année 0 dans la chronologie historique : on est passé directement de l'année 1 avant J.-C. à l'année 1 de l'ère chrétienne. Le premier siècle avant J.-C. s'est donc déroulé entre l'an 100 et l'an 1 avant J.-C. inclus. L'année 0 fut introduite au XVIII^e siècle, par Cassini, pour faciliter le décompte des années antérieures à notre ère et pour qu'il y ait une continuité dans la chronologie mathématique. L'an 1 avant J.-C. fut donc noté année 0, l'an 2 fut noté -1 et ainsi de suite. Le premier siècle avant J.-C. se termina donc le 31 décembre -99 à 24 heures, mais il comporta bien 100 ans comme tous les autres. L'année 1209 avant J.-C., date présumée du cataclysme cosmique, correspond donc bien à l'année astronomique -1208.

20. J. Spanuth, *Le secret de l'Atlantide. L'empire englouti de la mer du Nord* (Copernic, 1977). Titre original : *Die Atlanter* (1976). Jürgen Spanuth était un érudit allemand, docteur en théologie et en archéologie. Son apport dans la compréhension de ce qui s'est passé dans la période 1205-1150 a été considérable. Il a montré que c'est un même cataclysme qui a provoqué les

dégâts subis en Egypte et en Allemagne du Nord et que Sekhmet, Phaéton et Surt étaient en fait des personnalisations différentes d'une seule et même comète vue et enregistrée sous des cioux différents. Il a aussi montré que les Peuples du Nord, chassés par le cataclysme, sont devenus une composante des Peuples de la Mer, après leur exode massif vers le sud de l'Europe.

21. Cité par Spanuth, p. 175. Ce passage essentiel fait partie des textes de Médinet Habou (tableau 17, 46), qui datent de l'époque de Ramsès III. Ces textes très importants ont été étudiés, relevés et traduits en anglais par les spécialistes de l'Université de Chicago. Ils figurent dans un livre en deux volumes : W.F. Edgerton and J. Wilson : *Historical records of Ramses III. The texts in Medinet Habu, vol. I and II*, in "The Oriental Institutes of the University of Chicago" (1936).

22. Textes cités par Spanuth, pp. 170-171. Ses sources modernes sont les suivantes : W. Hölscher, *Libyer und Aegypter*, in "Beiträge zur Ethnologie und Geschichte libyscher Völkerschaften nach a altägyptischen Quellen" (1937) ; J.H. Breasted, *Ancient Records of Egypt* (1906-1907) ; H. Bellamy, *Moons, myths and man* (1938).

23. Si la chronologie haute devait s'avérer la bonne dans l'avenir, ce qui n'est pas exclu, l'année du cataclysme cosmique deviendrait 1231 avant J.-C. (ou -1230).

24. Texte cité par Spanuth dans son livre *Le secret de l'Atlantide*.

25. La date dans l'année devra être ajustée si l'année du cataclysme s'avère différente de celle-là, à raison de un jour pour quatre années. Elle pourrait concerner l'un des premiers jours de novembre si la chronologie haute s'avérait la meilleure.

26. M. Bucaille, *Moïse et Pharaon. Les Hébreux en Egypte* (Seghers, 1995). Un livre très important qui met quasiment fin à une interrogation deux fois millénaire : quel était le pharaon de l'Exode ? Ce pharaon a huit chances sur dix d'avoir été Merenptah, la neuvième appartenant à Ramsès II et la dixième appartenant à son successeur direct Amenmès (ou Taoui Thom, connu aussi en Grèce semble-t-il sous le nom de Typhon, et qui reste parfois cité comme le pharaon de l'Exode).

27. Maurice Bucaille (1920-1998) a eu en fait une chance unique. Il a obtenu l'autorisation, grâce à l'intervention et à l'appui indispensable de l'épouse du président égyptien Anouar el-Sadate (1918-1981), qui fut sa patiente à l'occasion d'un passage à Paris en 1974, de faire l'autopsie des momies égyptiennes dès la fin de la même année. Assisté par plusieurs collaborateurs égyptiens et français, et surtout du médecin légiste français Michel Durigon, Bucaille a ainsi pu montrer deux choses primordiales. D'abord que *Ramsès II n'a pas pu être en personne le pharaon de l'Exode*, car il souffrait d'une affection hautement invalidante (mais il n'est pas tout à fait exclu que l'Exode ait eu lieu à l'époque de Ramsès II). Par contre, il a pu

prouver que Merenptah mourut victime de traumatismes multiples ayant occasionné de très graves lésions quasi instantanément mortelles, notamment un traumatisme crânien. Meremptah est très probablement mort *durant le Passage, mais son corps a été récupéré et embaumé.*

28. Cette période de révolution a pu être diminuée pour certains fragments, à la suite de perturbations planétaires ultérieures, et la périodicité des approches serrées peut être totalement différente. La commensurabilité des périodes de révolution des astéroïdes et des comètes qui frôlent la Terre avec celle de notre planète varie de 1 an à près d'un siècle dans certains cas.

29. Quarante ans est une durée bien longue pour aller d'Égypte en Israël et les compilateurs des textes bibliques originaux ont un peu exagéré. Mais même si le voyage des Hébreux vers la Terre promise n'a duré que 20 ans, la double catastrophe s'explique aujourd'hui fort bien. Avant la nouvelle hypothèse privilégiée dans ce livre, cela sentait vraiment le coup de pouce.

30. Il existe un site internet détaillé concernant cet impact. Il se trouve à l'adresse : <http://www.chiemgau-impact.com>. Il bénéficie de nombreuses contributions de chercheurs de différentes spécialités. Le gros problème apparemment reste celui de la datation de l'impact, certaines données obtenues indiquant des dates différentes du V^e siècle avant J.-C. Plutarque (46-125), dans un de ses écrits historiques, parlait d'une catastrophe cosmique, très ancienne pour son époque, qui aurait eu lieu dans le pays des Celtes en -467. S'agissait-il de la comète de Chiemgau ?

31. Un film de 45 minutes a été réalisé en 2006 sur cette catastrophe cosmique et ses conséquences humaines. Il s'agit de *The Chiemgau comet – Time zero for the Celts* (documentary film by Sven Hartung and Guido Weihermüller). Il a été diffusé sur plusieurs télévisions européennes et existe en DVD. Ce film a été une révélation pour certains historiens de l'Antiquité.

32. E. Martin, *Un astéroïde a percuté la Terre à l'époque des pyramides*, Ciel et Espace, n° 440, pp. 8-14, janvier 2007.

33. C. Berlitz, *Les mystères des mondes oubliés* (Marabout, 1973). Titre original : *Mysteries from forgotten worlds* (1972).

CHAPITRE 20

L'INCONNU, L'AVENIR

Le XX^e siècle a permis une avancée considérable de nos connaissances sur l'Univers et sur la Terre. Mais de nombreux points restent obscurs et d'autres, soupçonnés, n'ont pas encore pu être confirmés ou définitivement abandonnés. Ce sera l'apanage des astronomes et des spécialistes des sciences de la Terre du XXI^e siècle d'apporter une réponse satisfaisante à ces dilemmes et incertitudes en cours. Nous allons voir quelques-unes de ces hypothèses qui constituent " *l'inconnu* ".

Ensuite, je parlerai de " *l'avenir* ", c'est-à-dire de ce qui attend la Terre, mais surtout nos descendants qui seront confrontés à des problèmes quasiment insolubles, qui, en fait, ne se sont pas encore présentés à l'homme depuis qu'il est devenu *Homo sapiens* comme, par exemple, la future inversion géomagnétique ou un impact multiple (une pluie de comètes ou d'astéroïdes) comme celui des fragments de SL9 sur Jupiter en 1994.

Nos successeurs devront faire preuve de pragmatisme pour survivre, mais aussi d'*audace* pour envisager et mettre au point des techniques qui leur permettront de faire face à des situations que nous n'aurions pas été, nous-mêmes, Terriens du XX^e siècle, capables de résoudre dans des conditions satisfaisantes. Faisons confiance à nos descendants pour qu'ils prennent en compte, et surtout à temps, ce que certains scientifiques visionnaires appellent " *l'impératif extraterrestre* ", une nécessité vitale si l'humanité veut survivre en tant que telle, ou tout au moins faire face à une surpopulation qui s'annonce à moyen terme comme un danger de première grandeur.

La formation du cratère lunaire Giordano Bruno en 1178

Parmi les hypothèses crédibles, mais non confirmées, figure en bonne place la formation très récente du cratère lunaire Giordano Bruno (1). Certains chercheurs croient que ce cratère de 20 km de diamètre, qui est situé sur la face cachée (latitude 36° N et longitude 103° E), a été créé le 18 juin 1178, c'est-à-dire hier à l'échelle astronomique. Ce cataclysme est rapporté dans une chronique anglaise, intitulée " *Chronique Mineure* ", due à Gervais de Canterbury, un moine du XII^e siècle, dans les termes suivants :

" Alors que dans la soirée du 18 juin de l'an de grâce 1178 j'observais la Lune avec d'autres moines de notre monastère, nous vîmes comme une torche flamboyante jaillir de son croissant. Elle vomit sur une grande distance du feu, des tisons brûlants et des étincelles. Le corps de la Lune palpait comme en agonie et se tordait comme un serpent coupé. " (2)

Le 18 juin de Gervais est une date *julienne* qui correspond au 25 juin 1178 dans le calendrier *grégorien* (3) qui est le nôtre. Cette date est compatible avec l'impact d'un objet faisant partie du "*Complexe des Taurides*" dont j'ai parlé dans plusieurs chapitres.

Ce texte du frère Gervais n'avait pas jusqu'alors attiré l'attention. Que s'est-il passé sur la Lune ce 18 juin 1178 ? Cette "torche flamboyante" serait-elle une colonne de feu provoquée par une explosion consécutive à un impact ? Ce sont l'astronome française Odile Calame et son confrère américain Derral Mulholland qui ont proposé les premiers cette hypothèse d'un impact sur la face cachée de la Lune. Après avoir étudié attentivement les excellentes photos prises à bord des sondes *Apollo*, ils proposèrent alors le cratère Giordano Bruno comme contrepartie lunaire au texte du moine anglais. La fraîcheur de ce cratère et aussi les traînées brillantes qui convergent vers lui indiquent une création très récente. Giordano Bruno est l'un des seuls candidats possibles et nettement le plus probable. Un cratère terrestre ou lunaire de 20 km peut être causé par un astéroïde de 500 mètres de diamètre. Un tel impact peut se produire en moyenne tous les 10 000 ans sur la Terre et il n'est en rien invraisemblable sur la Lune tous les 50 000 ans, notamment dans une période, comme l'actuelle, qui a subi une "pollution" cosmique exceptionnelle, du fait de la désintégration du centaure Hephæstos dans le Système solaire intérieur.

D'autre part, la date du phénomène observé par Gervais a immédiatement attiré l'attention. La deuxième quinzaine de juin fait obligatoirement penser au "*Complexe des Taurides*" et aux nombreux débris de Hephæstos. Certains spécialistes, parmi lesquels l'astronome allemand Jack Hartung (4), qui confirma le bien-fondé de l'hypothèse de Calame et Mullholland, ont rappelé que ce cataclysme lunaire est à rapprocher de l'événement de la Toungouska et des "tempêtes météoritiques" enregistrées par les sismomètres installés sur la Lune par les astronautes des différentes missions lunaires *Apollo*.

Quels sont les arguments scientifiques qui sous-tendent cette hypothèse d'un impact lunaire contemporain qui a trouvé une certaine crédibilité avec l'impact de la comète P/Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994 ? En effet, avec cet événement imprévu mais arrivé fort à propos, on a eu la confirmation que l'impactisme planétaire est aussi contemporain dans tout le Système solaire, système Terre-Lune compris. Et de toute manière, il est bien évident que la surface lunaire n'a nullement son aspect définitif, et qu'elle subira obligatoirement d'autres impacts importants dans l'avenir, de beaucoup supérieurs aux modestes 20 km de Giordano Bruno. Donc, c'est vrai qu'il peut se produire un impact important n'importe quand.

Etonnamment, les astronomes ont trouvé que la Lune résonne comme une cloche. Ce résonnement pourrait être le vestige séculaire d'un impact très récent, qui justement remonterait à quelques centaines d'années seulement. Les 800 ans et quelques qui nous séparent de l'impact supposé sont assez plausibles dans cette optique.

Pourtant, l'hypothèse de l'impact en 1178 n'a pas convaincu pas la majorité des astronomes. Pour ces sceptiques, si le cratère est indéniablement récent (à l'échelle astronomique), il daterait quand même de plusieurs dizaines ou même centaines de milliers d'années, et ils croient surtout que le résonnement observé doit pouvoir s'expliquer par d'autres raisons liées à des phénomènes internes, des problèmes de sismicité, de libration et de *résonance* (à ne pas confondre avec résonnement).

L'énigme de la formation du cratère Giordano Bruno ne pourra être définitivement résolue qu'après une visite *in situ*, qui malheureusement n'est pas pour demain, malgré son grand intérêt.

Un impact en Antarctique = déglaciation partielle

Pour tous les scientifiques qui ont étudié le problème un tant soit peu dans le détail et sans idée préconçue, le danger principal pour la Terre serait un impact, même relativement modeste, en Antarctique. Il apparaît qu'une déstabilisation de la cryosphère antarctique pourrait déboucher sur un authentique désastre écologique, et ensuite humain (5).

Au chapitre 18, j'ai longuement parlé de la dernière déglaciation en Europe, et rappelé que la montée des eaux a été de 110 mètres (6). La géographie a été totalement transformée, mais avec assez peu de répercussions au niveau humain, dans la mesure où la transgression a été progressive. A l'époque de la débâcle atlantique (appelée aussi *Déluge de Lascaux*), vers -13500, le niveau des océans augmenta de près de 20 mètres en quelques années seulement. Heureusement qu'il n'existait pas de villes côtières à l'époque.

Cet exemple montre ce qui pourrait se passer avec une déglaciation, même très partielle, de l'Antarctique, avec comme répercussion une montée générale des eaux océaniques de deux ou trois mètres seulement. Ce serait le pire désastre que l'humanité ait jamais connu. Aujourd'hui toutes les côtes sont truffées de villes, souvent hyper peuplées. Des pays entiers sont à fleur d'eau et seraient irrémédiablement noyés en quelques dizaines d'années. Une nouvelle refonte des sociétés humaines serait alors quasi inéluctable, avec les pires débordements que cela entraînerait, les nantis des pays peu touchés n'ayant nulle envie de partager la nouvelle pénurie issue de la débâcle glaciaire. On n'ose penser sur quoi déborderaient des migrations forcées de millions de personnes affamées et sans aucune perspective d'avenir, sinon la survie immédiate.

Et je ne parle pas évidemment d'une déglaciation générale due à un ensemble de causes dont les effets seraient additionnels (impact + effet de serre + augmentation générale de la température par exemple, mais aussi une augmentation de température due au seul Soleil à l'occasion d'une suractivité anormale). Notre civilisation ne s'en remettrait pas et retomberait rapidement dans la barbarie. La géographie serait à nouveau totalement remodelée avec une remontée des eaux de l'ordre de 60 à 80 mètres selon les

régions. Il ne faut jamais perdre de vue que de telles périodes ont déjà existé dans l'histoire de la Terre, périodes au cours desquelles notre planète avait totalement exclu la présence de glace de sa surface, pour des raisons non encore explicitées.

L'homme, lui, survivra. Mais il devra accepter un recul, pas forcément génétique, mais au moins culturel. C'est le moment de rappeler ici que la montée des civilisations n'a jamais été linéaire, et que les périodes de recul ont été nombreuses, notamment à la suite de cataclysmes de grande envergure, et en particulier ceux dus aux impacts. Le drame humain causé par l'impact de Sekhmet au XIII^e siècle avant J.-C. a fait reculer la civilisation grecque d'au moins quatre siècles, et il ne s'agissait que d'un cataclysme à l'échelle "régionale".

L'impactisme particulière : le vrai danger pour l'homme

Plus encore que l'impactisme macroscopique, il paraît évident pour l'homme que le principal danger (d'origine cosmique, car le principal danger pour l'homme, c'est l'homme) sera l'impactisme particulière. Nous allons voir deux éventualités, bien réelles à moyen terme, rattachées à ce problème.

Et si le Soleil se fâche un jour vraiment ?

Le Soleil est une étoile légèrement variable, comme je l'ai expliqué dans plusieurs chapitres. Le schéma du cycle solaire, avec ses hauts et ses bas tous les onze ans en moyenne, ressemble à la respiration cyclique de l'étoile, et pour la période 1750-2000 tout semble relativement normal, même si d'un cycle à l'autre, on note quand même certaines variations saisissantes.

Depuis quelques années, les climatologues s'inquiètent : il semblerait que la luminosité du Soleil augmente lentement (7), avec, en conséquence, premièrement une augmentation de l'énergie solaire reçue par la Terre, et corollairement un réchauffement global de la planète. Bien sûr, au niveau d'une seule décennie, il est très difficile de savoir si le phénomène, va continuer, s'arrêter, ou s'inverser.

Que la planète se réchauffe, personne n'en doute, les activités humaines et l'effet de serre qu'elles provoquent sont indiscutables. Mais le Soleil semble aussi avoir sa part dans le processus de réchauffement. Le flux solaire, qui est la quantité de lumière totale émise par le Soleil aurait augmenté de 0,036 % (36/10 000) entre 1986 et 1996, ce qui correspond à une augmentation de 0,5 watt par mètre carré. Les données qui conduisent à cette conclusion ont été obtenues grâce à quatre satellites spécialisés dans les études solaires et la haute atmosphère terrestre : *Nimbus 7*, *SMM* (Solar Maximum Mission), *UARS* (Upper Atmosphere Research Satellite) et *ERBS* (Earth Radiation Budget Satellite).

L'augmentation, quoique minime, si elle devait se poursuivre un siècle, finirait par provoquer un réchauffement moyen de 0,5 °C de la Terre, qui ajouté à celui dû à l'effet de serre qui pourrait être le triple (soit 1,5 °C) entraînerait un réchauffement global de 2 °C, réellement catastrophique, non en tant que tel mais pour les conséquences inévitables qu'il entraînerait.

L'activité solaire semble bien variable à l'échelle du siècle, et il faut se rappeler qu'entre 1645 et 1715, période sensiblement plus froide que la moyenne en Europe, le nombre de taches solaires a été très faible, parfois même inexistant. C'est la fameuse période appelée "minimum de Maunder", mise en évidence au XIX^e siècle par l'astronome britannique Walter Maunder (1851-1928), dont la véracité a été confirmée par la découverte de la quantité anormale de béryllium-10 dans les glaces polaires, quasiment 30 % supérieure à la moyenne ultérieure.

Le Soleil est un ami qui pourrait s'avérer dangereux, notamment durant la prochaine inversion géomagnétique, comme nous allons le voir. Jusqu'à présent, ses colères et ses sursauts ont toujours entraîné des perturbations psychologiques et physiques (voir les chapitres 8 et 16), mais maintenant, il semble bien qu'ils soient en mesure de déboucher sur une fragilité technologique préjudiciable, comme l'ont rappelé quelques incidents notables récents (coupures générales de courant et perturbations dans les circuits informatiques notamment).

La future inversion géomagnétique : un danger mortel

La dernière inversion géomagnétique totale remonte à 700 000 ans. C'est loin, très loin, même à l'échelle géologique. *Homo sapiens* n'existait pas encore, et j'ai expliqué au chapitre 15 que c'est peut-être grâce à elle, plus exactement aux conséquences qu'elle a engendrées dans une biosphère fragilisée à l'extrême, traumatisée même pendant quelques milliers d'années, que *Homo erectus* s'est transformé (a muté) en *Présapiens*, notre ancêtre direct, puisque nous n'en sommes séparés qu'au niveau de la sous-espèce.

Les spécialistes du paléomagnétisme (8) ont enregistré en moyenne trois inversions par million d'années durant les derniers soixante millions d'années, et tous savent que la prochaine ne saurait tarder maintenant, même s'il est encore impossible de la dater avec précision. On parle de milliers d'années, et on a proposé une inversion vers l'an 4000, en calculant la diminution annuelle, de l'ordre de 15 à 20 gammas, par rapport aux 40 000 gammas, valeur actuelle. Mais un effondrement reste possible quand l'intensité du champ sera tombée à quelques milliers de gammas.

On sait depuis longtemps que l'exposition des humains, et du monde animal en général, à des doses de radiations trop fortes conduit à des cancers (notamment de la peau et de la thyroïde, mais pas seulement), c'est-à-dire à une croissance incontrôlée des tissus vivants. Si cette irradiation n'est pas enrayée très rapidement, c'est la catastrophe. Catastrophe qui nous guette.

" Les radiations agissent sur l'organisme en provoquant des réactions qui libèrent des électrons énergiques dans les cellules avec les effets suivants : ils peuvent attaquer directement les molécules contenant l'information génétique des cellules, qu'on appelle l'ADN, ou bien ils peuvent, en détruisant les innombrables molécules qui existent dans une cellule, en générer de nouvelles qu'on appelle des "radicaux libres", oxydants, qui attaquent l'ADN. " (9)

L'organisme humain est très fragile dès qu'il se passe quelque chose d'anormal qui le perturbe ou l'agresse un tant soit peu, et il n'aime pas les apports extérieurs anormaux. Certains organes sont particulièrement exposés au cancer (c'est le cas notamment pour le poumon avec le tabac, le foie avec l'alcool, la peau avec les radiations UV solaires). Tchernobyl a montré que les irradiés voyaient leur tension artérielle monter en flèche dans des proportions inquiétantes, avec une extraordinaire fragilisation de l'organisme traumatisé. Les plus faibles sont très mal armés pour supporter les radiations anormales et sont alors irrémédiablement condamnés.

C'est la raison pour laquelle une forte irradiation durant une longue période ne peut que déboucher sur un désastre génétique et humain, dont on a encore qu'une très vague idée. Oui, l'avenir sans bouclier magnétique est inquiétant ! Et nos successeurs devront impérativement s'y préparer pour y faire face et limiter les dégâts.

Conclusion : l'impératif extraterrestre

Ce concept d'*impératif extraterrestre* est dû à l'ingénieur spatial américain, d'origine allemande, Krafft Ehricke (1917-1984) (10) qui, comme quelques autres grands savants allemands, se vit proposer un contrat de travail par les Américains à la fin de la dernière guerre. Le premier, Ehricke a compris que l'avenir de l'homme, à long terme, se situait dans l'espace, et toute sa vie il a été un fervent propagandiste de l'exploration des diverses planètes, mais surtout de l'humanisation du Système solaire. Vérité difficile à faire accepter, même aux Etats-Unis, car très onéreuse et peu susceptible d'amener des résultats tangibles immédiats. Comme beaucoup de visionnaires, ce premier philosophe de l'espace fut souvent critiqué et considéré comme un utopiste.

Et pourtant, pour tous les savants qui voient plus loin que le présent immédiat, l'avenir de l'homme, c'est bel et bien l'espace (11). Cette vérité, déjà assénée par les pionniers de l'astronautique, sera incontournable à long terme. Un astrophysicien comme Nicolas Prantzos n'en doute pas. Dans son livre *Voyages dans le futur* (12), sous-titré *L'aventure cosmique de l'humanité*, il envisage déjà très sérieusement la place de l'homme dans cet Univers en perpétuelle évolution.

Il n'est pas évident que la Terre soit très longtemps habitable pour les hommes, tout au moins tels qu'ils existent actuellement, et "fabriqués" pour être performants dans des conditions atmosphériques et climatiques assez

étroites. La biosphère peut se trouver altérée, notamment en cas de catastrophe nucléaire (voir Tchernobyl) et devenir rapidement invivable, avec des répercussions sur la stérilité de certaines espèces, dont la nôtre. En quelques générations, l'espèce humaine pourrait être rayée de la carte, car incapable de se reproduire d'une façon viable.

L'impératif extraterrestre peut donner à l'homme une possibilité appréciable de survie provisoire, et même à plus long terme s'il arrive à s'adapter à la nouvelle donne. On sait que l'homme est la première espèce engendrée par l'évolution qui soit capable d'influer sur son avenir, ce qui est un progrès inouï par rapport aux espèces précédentes qui ne pouvaient que *subir*.

" Nos sondes quittent maintenant le Système solaire, porteuses de messages pour les étoiles lointaines, cependant que nos radiotélescopes se mettent à l'écoute des autres galaxies.

Trouver des formes de vie autres, dialoguer avec des civilisations extraterrestres, ces vieux rêves de l'humanité se concrétisent aujourd'hui. La réalité dépasse déjà la science-fiction...

A travers les planètes étranges et les étoiles nouvelles, les quasars et les trous noirs, bientôt les autres peuples de l'espace, n'est-ce pas sa propre identité que poursuit l'humanité dans sa quête cosmique ? " (13)

On voit où peut mener la contingence de Stephen Jay Gould, l'impératif extraterrestre de Krafft Ehrlicke et l'appel des étoiles de Carl Sagan (1934-1996) : à la survie de l'espèce humaine, si elle accepte l'exil de sa planète mère. En attendant l'étape suivante obligatoire : *Homo galacticus*, différent, plus moderne, mais bel et bien authentique successeur de *Purgatorius*, via *Oligopithèque*, *Homo erectus* et *Homo sapiens*. Quelques dizaines de millions d'années et quelques dizaines de cataclysmes d'origine cosmique séparent *Purgatorius* de son futur successeur cosmique, mais ils font partie de la même lignée, lignée dans laquelle nous sommes un simple jalon : "le Primate à la mode".

On apprécie encore davantage, malgré ses nombreux défauts, la période *cruciale* que nous vivons, et on savoure la chance unique d'avoir vécu ce grand jour du 20 juillet 1969 où Neil Armstrong (1930-2012) et Edwin Aldrin foulèrent le sol lunaire, faisant entrer l'homme dans une ère nouvelle.

Mais le rêve ne doit jamais faire oublier un impératif plus pragmatique : la *survie de l'espèce*. Et l'obligation en filigrane de rendre habitables les planètes voisines ou de prévoir une solution de remplacement. Pour ce faire, nous allons voir dans les sections suivantes deux solutions souvent envisagées. La première concerne surtout le long terme avec le terraformage de Vénus et de Mars. La seconde concerne l'installation de villes de l'espace et pourrait être éventuellement mise en place durant le XXI^e siècle, si le besoin s'en faisait vraiment sentir.

Rendre Mars et Vénus habitables

Quitter la Terre et s'installer ailleurs. C'est un vieux rêve sur lequel philosophaient les astronomes du XIX^e siècle, quand on croyait encore que l'habitabilité de Vénus et Mars était chose possible. Mais les progrès de l'astrophysique ont brisé ce rêve chimérique, et l'on sait aujourd'hui que ce ne sera pas facile de rendre habitables les deux planètes voisines. Car si elles sont facilement accessibles de nos jours aux sondes spatiales, les conditions de vie y sont pires que prévu, surtout sur Vénus qui devra être totalement terraformée pour devenir un lieu de repli à l'espèce humaine.

Mais, même si cela peut demander des milliers d'années, la tâche ne paraît pas insurmontable contrairement aux apparences. Certains ingénieurs spatiaux planchent déjà sur diverses solutions qui pourraient transformer les deux planètes voisines en annexes de la Terre au même titre que la Lune, et en général, ils se montrent assez optimistes.

Réchauffer Mars

Pour Mars, dont le cas est beaucoup plus simple, et sera donc résolu en premier, le terraformage passe d'abord par un réchauffement de son atmosphère, mais aussi par sa densification. On sait qu'actuellement la planète rouge est hostile à une vie comme la nôtre, ce qui n'a rien de surprenant compte tenu de la composition de son atmosphère, trop peu dense, trop froide, mais aussi toxique. Mais elle a probablement déjà accueilli la vie, apportée par des comètes ou de la poussière cosmique, vie qui a eu des difficultés à s'installer et à prospérer, avant de disparaître du fait peut-être d'un impactisme plus virulent encore que sur la Terre.

Pour les ingénieurs spatiaux, le problème immédiat est le suivant : il faut rendre possible l'existence d'eau liquide, qui apparemment a déjà existé dans un lointain passé (14). Pour ce faire, ils envisagent donc de modifier la composition des éléments volatils nécessaires à une vie quasi terrestre : eau, azote, carbone et oxygène qui existent déjà sur Mars, mais non sous une forme gazeuse. Ils existent seulement dans le sol de la planète et dans les calottes polaires.

Plusieurs scénarios sont à l'étude par les ingénieurs spatiaux, jamais à court d'idées neuves, sachant que le plus urgent est un réchauffement initial de l'atmosphère. On pense à introduire une grande quantité d'éléments volatils à partir d'un astéroïde carboné de type C que l'on ferait s'écraser à la surface. Un autre scénario plausible consisterait à introduire massivement des CFC (sigle de chlorofluorocarbures) qui sont des gaz de synthèse fabriqués à partir de méthane, d'éthane ou d'éthylène et de propène et qui ont la particularité d'être peu toxiques et miscibles dans l'eau. Du fait qu'ils absorbent le rayonnement infrarouge, ils participent à l'accroissement rapide de l'effet de serre et seraient très utiles pour réchauffer la planète d'environ une vingtaine de degrés.

Un autre scénario consisterait à introduire massivement des bactéries capables de métaboliser l'azote du régolite martien et de produire de l'ammoniac, autre gaz à effet de serre susceptible de réchauffer l'atmosphère d'une manière substantielle.

On pense que plusieurs processus différents seront nécessaires au début pour envisager avec succès le terraformage de Mars (15). Science-fiction d'aujourd'hui et réalité d'après-demain, tous les spécialistes y croient comme une probabilité sérieuse à long terme. Les plus optimistes pensent même qu'un seul millier d'années pourrait suffire, ce qui semble quand même très optimiste.

Refroidir Vénus

Rendre Vénus habitable sera beaucoup plus difficile et beaucoup plus long. Elle a une atmosphère écrasante, puisque sa pression à la surface est de l'ordre de 90 atmosphères terrestres, et brûlante avec une température de surface voisine de 500 °C. On sait que le formidable effet de surchauffe est du principalement au gaz carbonique et à la vapeur d'eau. Son terraformage consistera donc d'abord, à l'inverse de ce qu'il faudra faire pour Mars, à refroidir l'atmosphère et surtout à la désépaissir sérieusement.

On pourrait tenter de souffler cette atmosphère en faisant s'écraser plusieurs astéroïdes de taille décakilométrique, mais cela paraît bien insuffisant. On a aussi parlé de faire désintégrer des NEA de type Aten et Apollo (des Vénus-crossers qui existent déjà par milliers) à proximité de Vénus, entre celle-ci et le Soleil, pour diminuer la chaleur extérieure reçue par la planète. C'est la technique envisagée par Christian Marchal, un ingénieur français, à la fin des années 1970 (16). Privée d'énergie solaire, Vénus pourrait refroidir progressivement, mais on voit mal comment on pourrait obliger la matière désintégrée à rester en permanence entre Vénus et le Soleil, à moins de renouveler constamment le processus. Dans ce scénario, l'impactisme planétaire et les NEA seraient donc de précieux alliés de l'homme dans sa conquête de l'espace. Les impacts n'auraient donc pas obligatoirement un effet négatif.

Carl Sagan (17), dans les années 1970, se montrait extraordinairement inventif et optimiste, prônant d'ensemencer les nuages vénusiens avec une algue (l'espèce *nostocacae*) qui effectuerait sa synthèse et qui permettrait au gaz carbonique et à l'eau de se convertir en composés organiques, surtout en hydrates de carbone et en oxygène.

" Les algues seraient transportées par la circulation atmosphérique vers des couches plus basses de l'atmosphère, où elles seraient cuites. La cuisson d'une algue libre dans l'atmosphère de simples composés carboniques, du carbone et de l'eau. La teneur en eau demeure constante, tandis que le résultat est la conversion du gaz carbonique en carbone et en oxygène...

Comme le gaz carbonique est converti en carbone et en oxygène, et que l'oxygène se combine chimiquement avec l'écorce de Vénus, la pression globale s'abaisserait, ainsi que le taux d'absorption atmosphérique de l'infrarouge, l'effet de surchauffe se réduirait, et la température descendrait.

Ainsi donc il se peut que l'injection dans les nuages de Vénus d'algues cultivées à cet effet – algues dont le rythme de reproduction excéderait celui de la cuisson – transforme, à terme, le milieu vénusien, aujourd'hui extrêmement hostile, en un lieu plaisant pour les êtres humains. " (18)

Sagan, qui n'y allait pas de main morte, concluait qu'une fois condensée à la surface de Vénus, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère donnerait une couche d'eau d'une trentaine de centimètres : " *Pas un océan, mais de quoi irriguer le sol et satisfaire les besoins humains* ". Avec lui, le problème de la survie de l'homme en dehors de son berceau terrestre ne faisait pas de doute. Il faut simplement s'attaquer au problème dès que possible.

La diminution drastique des crédits de la NASA consacrés à l'espace, à l'époque du Président Ronald Reagan (1911-2004), dans les années 1980, a tempéré ce bel optimisme des années 1970. Aujourd'hui encore, au début des années 2010, il faut admettre que les priorités budgétaires sont plutôt terrestres (militaires) et que l'espace n'est plus une priorité et devra attendre des jours meilleurs en dépit de quelques succès ponctuels retentissants. Mais les idées restent, et il y en aura d'autres.

Le danger des radiations existera toujours

On peut faire toute confiance à nos successeurs, ils trouveront probablement le moyen de rendre habitables les deux planètes sœurs. Avec du temps, quelques milliers d'années pour Mars, quelques dizaines de milliers d'années pour Vénus sans doute, ils viendront à bout de ce double chantier qui paraît quelque peu surhumain et utopique avec nos moyens actuels.

Mais, quoi qu'il en soit, rien ne sera jamais totalement idyllique. En effet, il faut bien garder une chose à l'esprit. Vénus et Mars seront toujours soumises, comme notre Terre, à un double impactisme : impactisme macroscopique, mais surtout particulière. On sait que l'atmosphère terrestre est notre indispensable bouclier antiradiations. Qu'en sera-t-il des futures atmosphères martienne et vénusienne terraformées ? Pourront-elles filtrer, comme la nôtre, les rayons ultraviolets, X et autres particules crachés sans discontinuer par le Soleil ? Et les rayons cosmiques, ne perturberont-ils pas la belle atmosphère relookée par les ingénieurs spatiaux ? Comme nous l'avons vu plus haut, une colère du Soleil aurait aussi ses répercussions sur les deux planètes, surtout sur Vénus d'ailleurs qui est plus proche et donc davantage exposée.

Envisager des colonies extraterrestres artificielles

Hors les deux planètes voisines, aucun autre astre du Système solaire n'est terraformable dans les millénaires à venir. Seules des stations spatiales peuvent être envisagées sur certains astéroïdes ou quelques satellites, mais ce n'est pas la même chose qu'une planète habitable. Eros, par exemple, pourrait accueillir une mini-colonie humaine, mais pour y faire quoi, si ce n'est une station scientifique du genre de celles qui ont envahi l'Antarctique ? Quelques centaures pourraient également accueillir des stations de reconnaissance, mais il ne s'agira jamais de colonisation avec une vie qui serait acceptable pour les humains.

Contrairement à l'alternative précédente consistant à terraformer les deux planètes voisines, qui ne peut devenir opérationnelle que sur le long terme (1000 ans pour Mars, plusieurs milliers d'années au bas mot pour Vénus), les colonies extraterrestres artificielles peuvent se mettre en place en quelques décennies seulement. D'où leur intérêt évident, même si cela a encore un petit côté science-fiction. Cette éventualité a été étudiée dans les années 1970, notamment par le physicien américain Gerard O'Neill (1927-1992) qui a écrit un livre passionnant (et évidemment très controversé) sur le sujet : *Les villes de l'espace* (19) . Il considère à juste titre, que de telles colonies assureraient la survie de l'humanité en cas de cataclysme.

" Quand nous aurons colonisé l'espace interplanétaire - ce qui pourrait se produire dès le début du XXI^e siècle, d'après le calendrier du physicien de Princeton Gerard K. O'Neill - nous aurons accessoirement gagné notre indépendance par rapport aux futures catastrophes de la Terre. La survie des plus adaptés, à l'échelle d'un bouleversement géologique, pourrait signifier celle des espèces qui, à un moment donné, ont réussi la conquête de l'espace. " (20)

O'Neill postule pour l'installation d'îles de l'espace *aux points de Lagrange* (21) L5 et L4 de la Lune, ou plus exactement dans les régions de stabilité tournant autour de ces points selon une très grande orbite. Il appelle d'ailleurs ces zones de stabilité *Lagrangia*. Pour lui, si l'humanité s'y prend suffisamment tôt, elle peut assurer pour longtemps sa survie hors de la Terre, si celle-ci devait être menacée par un cataclysme cosmique ou écologique rendant notre planète invivable.

" Dans chacune de ces régions, un grand nombre d'habitats pourraient s'installer ; ils graviteraient autour de leurs points de Lagrange en 89 jours, parcourant lentement une orbite de 800 000 kilomètres environ. Cinq mille habitats, disposés dans un même plan autour d'un point de Lagrange, occuperaient un disque de 16 000 km de diamètre environ, ce qui est bien peu, comparé à la dimension de l'orbite stable. Chaque grande communauté pouvant accueillir plusieurs milliers de personnes, Lagrangia pourra accueillir une population totale plusieurs fois

égale à celle de la Terre. Incidemment, nous n'avons pas à redouter que les orbites de Lagrange elles-mêmes deviennent trop petites. On pourrait placer des communautés sur n'importe quelle orbite du Système solaire ; des modèles appropriés de miroirs leur fourniraient en permanence un ensoleillement aussi intense que celui que nous connaissons (quand il fait beau) sur Terre. " (22)

On voit l'extraordinaire optimisme (l'utopie pour beaucoup) du physicien américain, très violemment contesté aux Etats-Unis dans les années 1970, qui résout à la fois le problème du cataclysme cosmique destructeur pour l'humanité, mais aussi celui, peut-être plus immédiat, de la surpopulation au XXI^e siècle. Malheureusement, comme tous les visionnaires, O'Neill n'est pas près d'être suivi, les contingences financières réduisant son projet à zéro, tout au moins pour l'immédiat.

Une chose apparaît clairement à la lecture de son livre : l'humanité n'est en rien condamnée d'avance si elle accepte de s'expatrier, pour survivre d'abord et pour se multiplier et coloniser le Système solaire ensuite. Le cosmos l'attend... C'est bien le XX^e siècle, totalement révolutionnaire, qui aura fait prendre conscience à l'homme que son avenir est cosmique. Comme l'a écrit, dès le début du siècle, le savant russe Konstantin Tsiolkovski (1857-1935), l'un des pionniers de l'astronautique :

" Notre planète est le berceau de l'humanité, mais on ne reste pas au berceau toute sa vie. " (23)

Spaceguard : la sauvegarde de l'humanité

L'impératif désormais admis par tous (astronomes, militaires et politiciens) est la prise en compte du danger cosmique. On comprend mieux aujourd'hui l'intérêt de la fondation *Spaceguard*. Identifier tous les objets potentiellement dangereux, qui ont leur sigle depuis les années 1990 : PHO (pour *Potentially Hazardous Objects*) et calculer toutes les approches serrées à l'avance pour pouvoir intervenir en temps utile si cela est réellement nécessaire. C'est le minimum sur lequel tout le monde est d'accord.

Une liste des approches prévues existe depuis plusieurs années et elle est constamment actualisée par les spécialistes. Les très fortes approches réelles (à moins de 0,050 UA) se chiffreront à plusieurs milliers par siècle. Mais cette liste reste pour le moment très incomplète. Il est bien évident que les objets les plus dangereux sont ceux qui ne sont pas encore découverts. Apophis, découvert en 2004 seulement, l'a confirmé.

Comme je l'ai expliqué, l'affaire est devenue à la fois scientifique et à la fois militaire. Les stratèges militaires américains, mais aussi russes et chinois ne pouvaient pas laisser de côté le fameux "*ennemi extérieur*", une véritable aubaine pour tous. Les militaires se sont institués "sauveurs de l'humanité", et pour être totalement crédibles (ce qui est loin d'être le cas, surtout aux

États-Unis), ils sponsorisent (parallèlement à leurs propres investigations technologiques) la recherche d'astéroïdes potentiellement dangereux. Tous sont partie prenante financièrement, directement ou indirectement, de la fondation *Spaceguard*, qui avec son côté international, se veut rassurante et pragmatique. De nombreux documents de travail essentiels sont parus à ce sujet (24/25), abordant les divers problèmes scientifiques et techniques indispensables à bien maîtriser.

Une chose est déjà sûre : le Congrès américain a péché par optimisme en croyant que les astronomes seraient capables d'identifier la quasi-totalité des NEO en une dizaine d'années. Comme l'a bien expliqué le spécialiste italien Andrea Carusi, premier responsable de *Spaceguard* :

" Le Congrès américain a péché par optimisme. Comme l'a démontré le rapport Morrison, il est impensable d'identifier - et certainement pas en dix ans - tous les objets dangereux. Parmi les objets menaçants, on compte les comètes, que leur révolution soit courte ou longue. Or, tandis que l'on peut suivre le parcours des comètes de révolution courte, certes difficilement et avec une certaine approximation, les comètes de révolution longue sont totalement imprévisibles. Elles sont généralement découvertes quand elles se trouvent déjà bien à l'intérieur du système planétaire, quelques mois avant de passer à proximité du Soleil (donc de la Terre). Néanmoins, selon les estimations les plus courantes, l'ensemble des comètes ne représente que 10 % tout au plus de la population des objets, alors qu'elles constituent environ 25 % du danger total. " (26)

Les astronomes se méfient terriblement des comètes depuis 1983, quand IRAS-Araki-Alcock, comète usée (et donc d'apparence astéroïdale à plus de 0,20 UA de la Terre) de plusieurs kilomètres de diamètre, qui a une période de révolution de l'ordre de 1000 ans, est venue frôler la Terre sans coup férir, et surtout sans s'annoncer, puisqu'elle a été découverte au dernier moment (voir le chapitre 7). La Terre et l'espèce humaine l'ont échappé belle ! D'autres objets identiques existent, c'est obligatoire, et ne seront identifiés qu'alors qu'il sera déjà trop tard pour réagir efficacement, si le besoin s'en fait vraiment sentir. Les astronomes ne sont pas des magiciens, et il ne faut pas leur demander l'impossible.

Cela dit la fondation *Spaceguard* est une avancée importante puisqu'il s'agit du premier programme auquel acceptent de participer des pays comme les États-Unis, la Russie et la Chine, et ses résultats sont spectaculaires. Spacewatch, le télescope automatique installé à Kitt Peak, a magnifiquement dégrossi le terrain avec sa cinquantaine de découvertes annuelles depuis 1990. Une dizaine d'autres équipes depuis 1996 lui ont prêté main forte avec un succès inattendu par son ampleur puisque ce sont plusieurs centaines d'objets nouveaux qui sont découverts chaque année.

On l'admet enfin aujourd'hui : le danger venu de l'espace reste omniprésent à l'échelle astronomique. C'est la raison pour laquelle le cataclysme destructeur prévu par les statistiques ne pourra pas toujours être évité. Une épée de Damoclès existe en permanence au-dessus de nos têtes.

Faire face aux impacts : les stratégies envisagées

J'ai expliqué au chapitre 4 comment les militaires américains, qui se désespéraient à la fin des années 1980 de la disparition de leur ennemi traditionnel avec la désintégration de l'URSS, avaient rapidement trouvé la parade à leurs déboires et à la baisse annoncée de leurs (énormes) crédits d'armement. En faisant connaître au monde, mais principalement au peuple et au Congrès américains, l'existence d'un redoutable "*ennemi extérieur*" sous forme de météorites géantes qui pénètrent chaque mois dans l'atmosphère terrestre, ils s'imposaient en même temps comme les sauveurs incontournables de la planète pour l'avenir.

Leurs nombreux ingénieurs et experts en tout genre eurent vite fait d'entreprendre des recherches pour mettre au point des parades aux possibles impacts d'astéroïdes et de comètes. De nombreux scénarios (27) ont été étudiés pour *détruire*, ou plus simplement *détourner*, tout objet qui s'avérerait dangereux. Mais les scientifiques ne veulent pas être en reste, et plusieurs d'entre eux ont déjà mis au point des solutions, certaines fort astucieuses. En fait, dans l'avenir, les décideurs (des politiques sans doute) auront le choix entre plusieurs ripostes possibles, pouvant être différentes selon le type et la taille de l'objet menaçant. Nous allons en étudier quatre sommairement, mais il en est d'autres qui s'avéreront également crédibles, une fois qu'elles auront été améliorées.

– 1. *La bombe nucléaire*. C'est bien sûr la solution militaire, déjà évoquée dans le film *Meteor*, sur laquelle travaillent Américains, Russes et Chinois. Elle est quasiment au point, car depuis de nombreuses années tous les calculs théoriques indispensables ont été effectués. Dans ce scénario classique, des charges nucléaires sont emportées par des fusées et tirées sur le corps céleste menaçant. Les simulations montrent qu'un projectile de 30 tonnes pourrait dévier de 100 mètres environ la trajectoire d'un astéroïde. C'est peu, mais suffisant, semble-t-il, pour détourner un objet sur une orbite de collision sur une autre orbite sans danger.

Les spécialistes voient grosso modo les choses de la manière suivante : l'explosion d'une charge nucléaire à la surface même d'un astéroïde créerait un cratère important et cela entraînerait une substantielle perte de masse. L'impulsion et l'onde de choc déclenchées seraient suffisantes pour détourner l'objet menaçant. Le risque est double dans l'hypothèse de la bombe cosmique. Le principal est lié au lancement, gare s'il est raté, la Terre en subirait les conséquences. L'autre risque est celui de briser l'astéroïde en de nombreux fragments qui poursuivraient leur route. On se trouverait alors face à un *impact multiple*, du genre de celui de la comète Shoemaker-

Levy 9 sur Jupiter avec une vingtaine de fragments principaux de taille pouvant être kilométrique et hectométrique selon le diamètre du corps initial, ou même carrément face à une *pluie de mini-fragments* qui pourrait s'avérer extrêmement dangereuse et totalement incontrôlable, avec une multitude de cataclysmes *locaux* meurtriers. Pour pallier ce danger, certains spécialistes préconisent plutôt de faire exploser l'arme nucléaire, non sur l'objet lui-même, mais à côté. L'onde de choc engendrée par l'explosion devrait également être suffisante pour dévier l'objet dangereux, mais on n'en est encore qu'aux simulations, et entre simulation et la réalité, il peut y avoir des variantes d'importance.

– 2. *Le filet à billes*. Cette solution a été proposée par le physicien américain Edward Teller (1908-2003), le père de la bombe H, qui a repris du service à près de 90 ans. Son vieux cerveau, toujours créatif, a imaginé un stratagème remarquable, qui pourrait être fort efficace si l'objet cosmique menaçant n'est pas trop volumineux (200 mètres), et qui a le gros avantage de ne pas faire appel au nucléaire. Le scénario est le suivant. Une multitude de microprojectiles d'une vingtaine de grammes au maximum (plusieurs millions de billes de tungstène, d'après Teller) sont largués à proximité du corps cosmique, en avant de celui-ci. Pour éviter qu'elles s'éloignent les unes des autres, elles sont reliées entre elles par une fibre solide, un véritable filet, qui entre en collision avec l'objet menaçant à grande vitesse. La première bille le transperce à une grande profondeur, la seconde continue le travail et ainsi de suite. Le criblage de la surface, puis de l'intérieur de l'objet, par des dizaines de milliers de microprojectiles lancés à grande vitesse devrait pulvériser un objet jusqu'à 200 mètres de diamètre.

– 3. *Le miroir géant*. Cette solution astucieuse a été proposée par le planétologue américain Jay Melosh et pourrait être efficace pour des gros objets, notamment des comètes, si on les découvre longtemps avant l'impact calculé. Elle consiste à faire fondre l'objet menaçant. Dans ce scénario, un miroir concave géant (plusieurs centaines de mètres) en aluminium est lancé dans l'espace. En focalisant les rayons du Soleil en permanence sur une partie très précise du corps cosmique, on doit pouvoir augmenter sa température jusqu'à 1000 °C environ. Cela devrait entraîner la fonte d'une partie importante du corps céleste, surtout s'il s'agit d'une comète, et permettre de le dévier sur une orbite sans danger pour la Terre.

– 4. *Le billard cosmique*. Cette technique n'est pas nouvelle (en tant qu'idée) et a déjà été envisagée pour détruire un objet menaçant, à condition que l'on sache longtemps à l'avance la date de collision prévue. Elle consiste à changer la course d'un petit objet céleste, de telle manière qu'il entre ensuite à grande vitesse en collision avec un objet plus gros, les deux étant alors pulvérisés dans l'espace. Dans cette hypothèse, qui sera peut-être envisageable dans l'avenir dans certains cas particuliers, notamment celui d'une grosse comète dangereuse repérée longtemps à l'avance, il faut dans un premier temps tirer un projectile capable de dévier un petit astéroïde (avec l'option 1 de la bombe nucléaire) et maîtriser son orbite pour pouvoir atteindre le deuxième objet. Cette solution n'est pas pour demain, mais elle

pourrait être la plus efficace pour détruire un gros objet d'une dizaine de kilomètres.

Les militaires et les ingénieurs planchent maintenant sur les différentes formules acceptables qui peuvent être utilisées pour protéger la Terre du danger cosmique. Il paraît clair que plusieurs techniques puissent être envisagées selon la nature exacte du danger : une comète peut être plus facilement détruite qu'un astéroïde métallique. Outre les quatre possibilités évoquées ci-dessus, certaines autres peuvent se montrer appropriées à des cas particuliers. Un objet de cent mètres ne présente pas le même danger qu'un objet de taille kilométrique, et il sera nécessaire de bien appréhender le pour et le contre de chaque intervention. Il serait inacceptable que le remède soit pire que le mal lui-même ! C'est un risque à ne pas négliger.

Laisser des documents pour les civilisations futures

Les chercheurs actuels souffrent cruellement du manque d'informations disponibles concernant la haute antiquité, informations qui pourraient les éclairer sur les catastrophes terrestres et d'origine cosmique du passé. Je rappelle qu'aucun texte n'a expliqué clairement le cataclysme du Santorin, pourtant formidable, et qui ne date que du II^e millénaire avant notre ère. Son souvenir était déjà perdu chez les Grecs, et ne survivait que sous forme de légendes imprécises et complexes, quasiment indéchiffrables sur un plan scientifique. Les Crétois, et plus généralement la civilisation minoenne, n'ont laissé aucun témoignage sur ce cataclysme dont ils furent les principales victimes et auquel pourtant une partie non négligeable d'entre eux survécurent. On peut se demander pourquoi.

De tels documents écrits ont-ils existé ? Difficile à dire. Ont-ils été détruits ? On sait que des grandes bibliothèques ont été détruites inconsidérément, notamment celle d'Alexandrie. Mais de nombreux savants de l'Antiquité y ont eu accès auparavant, et aucun d'entre eux n'a parlé de textes écrits concernant le cataclysme du Santorin, ni des autres grands cataclysmes ayant eu pour cadre le Bassin méditerranéen.

Il est impératif aux yeux des scientifiques et autres intellectuels modernes de prévoir le pire (qui est bien loin d'être exclu), et de laisser à nos descendants *des traces écrites* de notre civilisation. On sait, d'une manière certaine, qu'un cataclysme peut détruire au cours des siècles prochains la civilisation actuelle. Mais de toute manière, il y aura des survivants qui "referont surface" et qui redémarreront très progressivement sur les ruines de cette ancienne civilisation. Ces survivants auront le droit de savoir ce qui s'est passé *avant le cataclysme* qui les a fait reculer de plusieurs millénaires, et qu'il a existé, avant eux, une autre civilisation avancée. Le bouche à oreille qui prévaudra les premiers temps n'aura jamais la crédibilité suffisante pour assurer la transmission exacte des informations et des connaissances détenues par les survivants, et des écarts significatifs avec la réalité existeraient dès la deuxième génération. Ce savoir, *notre savoir*, résumé des

connaissances essentielles du monde ancien, devra être facilement accessible et compréhensible pour être utilisable par les descendants des survivants du cataclysme.

La destruction de documents anciens est un crime contre l'intelligence et la raison. Pour terminer ce chapitre, je propose le texte suivant dû à l'explorateur français Paul-Émile Victor (1907-1995), datant de 1981 et paru comme conclusion de l'avant-propos de la traduction française du livre de Charles Hapgood, *Les cartes des anciens rois des mers* (28) :

" ... Il y a deux mille ans, Jules César, au nom de la civilisation romaine, brûla Alexandrie. Avec Alexandrie disparut sa bibliothèque, unique au monde, de 500 000 volumes (on parle même d'un million...).

Il y a une décennie, Mao Tsé-toung, au nom de la civilisation chinoise communiste, fit détruire par sa révolution culturelle (culturelle... !) plusieurs centaines de milliers (on parle, là aussi, de plus d'un million) de livres uniques au monde.

C'est ainsi que disparaît toute trace des civilisations. " (29)

On sait que certains chercheurs (et notamment Charles Hapgood lui-même) ont postulé pour une civilisation ancienne relativement avancée et disparue sans laisser de traces, tout au moins de traces indiscutables, suite à un grand cataclysme géophysique qui aurait entraîné le déplacement des pôles géographiques. Cette idée, très contestée par les milieux scientifiques (et même parfois considérée comme farfelue), repose peut-être cependant sur une réalité aujourd'hui encore indéchiffrable. Pour éviter qu'une telle incertitude se reproduise dans l'avenir, il convient donc de préserver des témoignages concrets et précis de notre passage.

Faire savoir aux petits-enfants des survivants d'un holocauste nucléaire (ou moins probablement cosmique) que nous avons *vraiment* existé est une *obligation* minimale pour nous. Il est nécessaire d'*éclairer* ceux qui viendront plus tard, qui redémarreront à zéro et qui n'auront plus d'histoire. Dater approximativement notre passage ne devrait pas être trop difficile, il suffit de s'appuyer sur quelques événements astronomiques facilement déchiffrables. Aujourd'hui la question que toute personne raisonnable se pose est celle-ci : "*Combien de temps une civilisation comme la nôtre, qui possède les armes pour se détruire, peut-elle survivre ?*". J'ai rappelé au chapitre 18 que Platon, il y a vingt-cinq siècles, opposait déjà la raison et la mesure à la barbarie et au chaos. Le problème reste entier, mais la menace semble plus proche.

Notes

1. Il faut se rappeler que la première photographie de la face cachée de la Lune remonte à octobre 1959 seulement. C'est la sonde soviétique *Luna 3* qui transmet les premiers clichés tant attendus par les astronomes et qui s'avèrent extraordinaires dans la mesure où la face cachée est très différente de la face visible. Plus tard, quand les spécialistes furent en possession de clichés détaillés, le cratère Giordano Bruno attira l'attention par sa fraîcheur, signe d'une formation récente.

2. *Il y a 800 ans : une fantastique explosion*. Historia, 384, novembre 1978. Citation p. 2.

3. Je rappelle que l'année *julienne* vaut 365,25 jours et l'année *grégorienne* 365,2425 jours (l'année *tropique* valant, elle, 365,2422 jours). L'écart vaut 0,0075 jour par an, soit 0,75 jour par siècle. Le calendrier julien avait été remis à jour en 325 au *Concile de Nicée*, date à laquelle les Pères de l'Église enlevèrent 4 jours au calendrier julien pour faire coïncider la date de Pâques avec l'équinoxe de printemps (le 21 mars). En 1178 l'écart entre les deux calendriers était de 7 jours (en réalité 6,65 jours). Il convient donc de rajouter 7 jours pleins au 18 premiers jours de juin 1178. La date du possible impact lunaire est donc bien *le 25 juin* dans notre calendrier actuel. Cette date laisse à penser que le corps céleste responsable pourrait faire partie de la grande famille de Hephaistos, au même titre que l'objet de la Tougouska en 1908.

Pour ces problèmes de correspondance de calendriers, on peut consulter le *Que sais-je ?* de Paul Couderc régulièrement réédité : P. Couderc, *Le calendrier* (PUF QS 203, 7^e édition 1993) ou l'excellent livre de J.-P. Parisot et F. Suagher, *Calendriers et chronologie* (Masson, 1996) qui fait le tour de la question en grand détail.

4. Au fil des années, d'autres astronomes que les précurseurs de l'école catastrophiste britannique, comme Jack Hartung, admettent le bien-fondé de l'hypothèse du *Complexe des Taurides* et de l'origine de celui-ci.

5. J.-C. Duplessy et P. Morel, *Gros temps sur la planète* (Odile Jacob, 1990).

6. A. Capart et D. Capart, *L'homme et les déluges* (Hayez, 1986).

7. Ph. Henajeros, *Quand le Soleil brille trop...*, Science et Vie, 963, pp. 74-78, décembre 1997.

8. E. Thellier, *Magnétisme interne* (pp. 235-376 dans *Géophysique* (Gallimard, 1971), publié sous la direction de J. Goguel. Dans cet article d'un grand intérêt, Émile Thellier, l'un des pionniers du géomagnétisme, explique tout ce qu'il faut savoir sur le sujet.

9. G. Charpak et R.L. Garwin, *Feux follets et champignons nucléaires* (Odile Jacob, 1997). A noter surtout le chapitre 5 qui concerne " *Les radiations et le vivant* " (pp. 142-186). Citation p. 155.
10. M. Freeman, *Krafft Ehrlicke : l'impératif extraterrestre*, Fusion, 56, pp. 27-37, 1995. Un très bon article sur ce grand pionnier de l'exploration spatiale qui a compris l'un des premiers que la survie à long terme de l'espèce humaine passait par la conquête du cosmos. Ce fut le premier "philosophe" de l'espace, étonnamment très peu connu en France.
11. C. Sagan, *Pale blue dot : a vision of the human future in space* (Headline Book Publishing, 1995). Un grand livre de Carl Sagan (1934-1996) qui toute sa carrière a été un propagandiste de la vie dans le cosmos et qui a enseigné que l'avenir de l'homme est dans l'espace.
12. N. Prantzos, *Voyages dans le futur* (Seuil, 1998). Ce livre est sous-titré *L'aventure cosmique de l'humanité*. Nicolas Prantzos est un astrophysicien qui s'intéresse au futur de la vie et donc au futur cosmique de l'humanité. Très logiquement, il distingue les *futurs proches* des *futurs ultimes*.
13. C. Sagan, *Cosmic connection ou l'appel des étoiles* (Seuil, 1975). Titre original : *The cosmic connection, an extraterrestrial perspective* (1973). Citation p. 4 de couverture.
14. A. Louchet, *La planète Mars* (Masson, 1988). La planète Mars étudiée par un géographe.
15. Ph. Jamet, *Faire renaître la vie sur Mars*, Fusion, 63, pp. 4-23, 1996.
16. Christian Marchal est un ingénieur et polytechnicien français qui a travaillé à l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) de 1964 à 2001. L'un des premiers, il a saisi l'intérêt des NEA et de leur utilité pour tenter de viabiliser une planète comme Vénus, particulièrement inhospitalière. Il reste que son hypothèse est considérée comme utopique par beaucoup.
17. Carl Sagan se réjouissait de vivre à l'époque de la conquête spatiale et tenait à apporter sa pierre en apportant des idées originales. Dans la préface de *Cosmic connection*, il expliquait (p. 10) : " *Après des siècles de conjectures boiteuses, de spéculation débridée, de conservatisme pesant et de désintérêt à courte vue, la notion de vie extraterrestre arrive enfin à maturité* ".
18. C. Sagan, *Cosmic connection*, op. cit., citation p. 186.
19. G. O'Neill, *Les villes de l'espace* (Robert Laffont, 1978). Titre original : *The high frontier* (1976). Ce livre classique est dû à Gerard O'Neill, un physicien américain qui fut professeur à l'université de Princeton. On lui doit le concept des "îles de l'espace". Pour lui, la colonisation de l'espace est à la portée de notre civilisation.

20. Texte de R.N. Bracewell, cité dans le livre précédent, p. 211.
21. Le système Terre-Lune compte cinq points de Lagrange, notés de L1 à L5. Les trois premiers points L1, L2 et L3 sont situés sur l'axe Terre-Lune et sont associés à des points d'équilibre *instables*. Les plus intéressants sont donc les points L4 et L5 qui sont *stables* et qui forment chacun le triangle équilatéral avec la Terre et la Lune imaginé en 1772 par le mathématicien et astronome Joseph Louis, comte de Lagrange (1736-1813). Ce n'est qu'en 1906 que les premiers astéroïdes troyens (baptisés Grecs et Troyens) furent découverts dans le ciel formant un triangle équatorial avec Jupiter.
22. G. O'Neill, op. cit., citation p. 148.
23. Cité par N. Prantzios dans *Voyages dans le futur*, p. 21.
24. NASA, *The threat of large Earth-orbit crossing asteroids* (U.S Government Printing Office, 1993).
25. T. Gehrels (ed.), *Hazards due to comets and asteroids* (University of Arizona Press, 1994).
26. A. Carusi, *Astéroïdes et comètes : les menaces sur la Terre*, Pour la Science, 212, pp. 90-97, 1995. Citation p. 97.
27. S. Raphaël, *Feu sur les astéroïdes !*, Sciences et Avenir, 606, pp. 54-57, août 1997.
28. C.H. Hapgood, *Les cartes des anciens rois des mers* (Ed. du Rocher, 1981). Titre original : *Maps of the ancient sea kings* (1966). Un livre qui a fait grincer bien des dents, mais qui pose plus de questions qu'il n'en résout. Ces cartes de Hapgood sont un véritable casse-tête, et tous ceux qui ont voulu les prendre trop à la légère ne savent pas toujours de quoi ils parlent.
29. Avant-propos de Paul-Émile Victor pour le livre précédent. Citation p. 14. La possibilité d'une civilisation de niveau minoen, beaucoup plus tôt dans l'histoire des hommes, ne paraissait pas invraisemblable à l'explorateur français, troublé par l'existence de ces fameuses cartes étudiées par Hapgood et son équipe.

CONCLUSION

UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE ET CULTURELLE

L'impactisme terrestre : un puzzle qui est devenu lisible

En 1982, dans *La Terre bombardée*, j'avais tenté une première synthèse objective et scientifique sur la théorie de l'impactisme terrestre (alors encore embryonnaire) et sur son corollaire essentiel : le catastrophisme d'origine cosmique. Je disais alors que l'impactisme est un puzzle qui ne se laisse déchiffrer que pièce par pièce, et que seule une approche multidisciplinaire permettrait de faire avancer les choses.

Le bon accueil reçu par ce livre et l'ensemble des données nouvelles recueillies depuis lors m'ont conforté dans le bien-fondé de mon approche et surtout dans mes conclusions. En effet, les années 1980 et 1990, notamment grâce au débat multiforme lié aux causes physiques ayant entraîné la fin de l'ère secondaire, ont été mises à profit pour faire progresser certaines connaissances afférentes à plusieurs des sciences concernées. Ces nouvelles connaissances m'ont donné raison sur la quasi-totalité des points que je mettais en évidence.

C'est le caractère multidisciplinaire de ce puzzle scientifique qui a tant retardé, et qui retarde encore, sa compréhension, chaque chercheur opérant quasiment uniquement à l'intérieur de sa "sphère", sans communication avec les chercheurs des autres disciplines. Depuis 1982, les choses se sont quand même améliorées et les résultats ont suivi. Résultat, le voile épais qui entourait ce puzzle s'est déchiré et sa "lecture" est devenue possible. Tout paraît beaucoup plus clair aujourd'hui, même si certains points n'ont pas encore trouvé de solution acceptable.

Depuis longtemps déjà, l'astronomie a permis de comprendre les causes, c'est-à-dire le "pourquoi" de l'impactisme terrestre. La découverte, à partir des années 1930, de plusieurs milliers d'astéroïdes qui viennent à proximité relative de la Terre, les NEA, ou même qui frôlent pour une grosse moitié d'entre eux l'orbite terrestre, les EGA, a prouvé que notre planète est constamment sous la menace d'une multitude de petits corps célestes de quelques centaines de mètres de diamètre, ou même de quelques kilomètres pour les plus gros d'entre eux. Tous ont une espérance de vie extrêmement courte à l'échelle astronomique et géologique : quelques millions d'années seulement, et même sensiblement moins dans de nombreux cas.

Une seconde cause de l'impactisme terrestre (et planétaire en général) est l'existence d'un nombre important de comètes, injectées à la suite de perturbations dans le Système solaire proche, en provenance soit du nuage

de Oort, soit de la ceinture de Kuiper. Les astronomes ont clairement montré que cette population cométaire est constamment renouvelée et que le double stock est inépuisable puisqu'il comporte des objets par dizaines de milliards, certains pouvant être de dimensions quasiment planétaires (plusieurs centaines ou même plus d'un millier de km de diamètre parfois).

Les sciences de la Terre (la géologie et la géophysique principalement) ont fourni les preuves de la réalité de l'impactisme terrestre. D'abord par l'analyse de milliers de météorites et de tectites qui sont des petits objets tombés directement ou formés à la suite d'impacts importants. Ensuite, par l'identification de formations fossiles d'origine cosmique : les astroblèmes. Leur découverte, à partir des années 1950, a été le bain de jouvence dont avait besoin la théorie de l'impactisme pour trouver son deuxième souffle et pour prouver sa réalité, et donc sa crédibilité, aux yeux de ceux qui exigent des preuves : les scientifiques.

La physique a fourni la preuve de l'existence d'un impactisme invisible et sournois : l'impactisme particulaire, bien connu aujourd'hui mais encore insoupçonné avant le début du XX^e siècle. C'est lui qui est la cause des innombrables mutations d'origine cosmique qu'a subies la vie terrestre, animale et végétale, depuis son origine du fait d'un bombardement quasi ininterrompu de particules très énergétiques, et qui est une des clés, peut-être même la clé principale, de sa diversification incroyable en millions d'espèces différentes, parallèlement aux deux autres phénomènes cruciaux que sont les extinctions de masse et l'évolution darwinienne, également très efficaces, mais essentiellement sur des durées très différentes. L'extinction de masse et l'extinction partielle se jouent en quelques années seulement, l'inversion géomagnétique se compte en centaines ou milliers d'années et l'évolution darwinienne est efficace sur le très long terme : le million d'années au niveau de l'espèce et même beaucoup plus aux niveaux supérieurs de la diversité biologique dans son ensemble.

Les sciences de la vie, au même titre que les sciences terrestres, sont en effet intéressées par les conséquences de l'impactisme. Le problème de l'iridium surabondant à la frontière Crétacé-Tertiaire, à la fin des années 1970, a donné un extraordinaire coup de fouet à toutes ces disciplines qui ignoraient quasiment tout des menaces du ciel, ou qui ne les prenaient pas en compte dans leurs hypothèses de travail. L'astéroïde ou la comète qui a tué les dinosaures et qui a formé le cratère mexicain de Chicxulub a été une véritable révélation pour beaucoup de chercheurs totalement ignorants des choses de l'astronomie, en montrant le rôle décisif joué par les extinctions dans l'évolution.

On peut dire que les catastrophes cosmiques ont littéralement façonné la Terre et la vie terrestre depuis 4,6 milliards d'années. J'ai montré que l'homme actuel, lui-même, n'est rien d'autre que le *Primate à la mode*, maître provisoire de la "Création", appelé à être balayé à son tour par des catastrophes futures, parmi lesquelles certaines qu'il aura peut-être lui-même créées par son manque de pragmatisme et sa vision du très court

terme, au détriment du long terme qui seul devrait être pris en compte si l'on veut sauver l'espèce humaine des désastres qui la guettent. Ces catastrophes purement humaines sont principalement, on s'en doute, les désastres écologiques, mais aussi technologiques et politiques (guerre nucléaire toujours possible).

Enfin, j'ai montré, une nouvelle fois, que l'histoire récente des hommes a été affectée par des catastrophes cosmiques, d'importance secondaire certes à l'échelle terrestre, mais très suffisantes pour avoir eu des conséquences fort importantes à l'échelle humaine, notamment la refonte des sociétés humaines qui résulta de l'impact de la comète Sekhmet à fin du XIII^e siècle avant J.-C. L'hypothèse Hephaios permet de comprendre enfin ce qui s'est réellement passé il y a 3200 ans, mais aussi lors d'autres cataclysmes encore obscurs.

Le lecteur ne doit pas être surpris que ce livre ait été écrit par un astronome, spécialiste des géocroiseurs, plutôt que par un scientifique d'une autre discipline. Comme je l'ai souvent rappelé, l'impactisme est avant tout un *problème astronomique*, avant d'être un problème géologique et géophysique, et maintenant un problème biologique, paléontologique, anthropologique, et même historique et culturel, puisqu'il a des incidences sérieuses sur le plan philosophique et religieux (1).

L'impactisme et le catastrophisme enfin reconnus

C'est avec confiance et sérénité que je présente la quatrième (et dernière) version de ma synthèse, trente ans après la première de 1982, à la fois aux lecteurs cultivés et aux scientifiques des diverses spécialités concernées. L'impactisme et le catastrophisme ont pris maintenant leur vitesse de croisière. On peut même dire qu'ils se sont banalisés, et donc qu'ils ne sont quasiment plus contestés par la communauté scientifique *dans son ensemble* (à titre individuel, il y a encore, et il y aura toujours, des opposants farouches), ce qui était loin d'être le cas en 1982 quand j'ai publié la première mouture de *La Terre bombardée*. J'écrivais alors la conclusion suivante :

" Le faisceau de preuves et d'arguments favorables que nous avons développés est trop important et trop *convergent* pour que l'avenir ne nous donne pas raison, tout au moins sur la majorité des points essentiels et sur le fond. *L'important ce n'est pas d'être cru aujourd'hui, mais d'avoir raison demain.* L'histoire des sciences montre que le principal n'est pas de convaincre à tout prix les mandarins de l'époque, quand on défend une théorie résolument nouvelle et forcément dérangeante. Ces mandarins, imbus de leur autorité arbitraire et très souvent provisoire, sont maîtres pour snober ou pour étouffer ce qui risque de les faire passer de mode. Seule la jeune génération de chercheurs est capable de faire table rase des conceptions erronées, car seule

elle est vraiment intéressée par la *réalité* de l'histoire de la Terre, de la Vie et des Hommes. Les mandarins passent, la science évolue, les théories nouvelles apparaissent. C'est la roue qui tourne, et certaines affirmations qui peuvent paraître exorbitantes aux savants en place ne sont simplement que le reflet de cette science qui bouge et qui déjà leur échappe.

Ce livre aura atteint son but si, par les réactions et les travaux complémentaires qu'il suscite, il s'avère un jalon *utile* dans l'histoire de la théorie de l'impactisme terrestre. Cette théorie, ancienne et nouvelle à la fois, rencontre un accueil de plus en plus chaleureux au fur et à mesure que des arguments favorables sont développés. Nous sortons juste de la préhistoire dans le domaine des collisions d'objets cosmiques avec la Terre, et le futur s'annonce passionnant et inquiétant. Inquiétant, car saurons-nous faire face au prochain impact d'envergure ? Comme dans le film *Meteor*, les hommes pourront-ils détruire le prochain EGA menaçant, si on le découvre à temps, ou sera-ce une nouvelle Apocalypse ? Rien ne permet de donner une réponse sûre. " (2)

Si la communauté scientifique ne cherche plus à contester l'incontestable, il n'en reste pas moins qu'il y a un important travail d'information à faire pour promouvoir ces nouvelles théories que sont l'impactisme et le catastrophisme. Il faut savoir que les scientifiques ne sont pas tous sur la même longueur d'onde et que la multidisciplinarité à ses limites, du fait que les chercheurs des différentes spécialités voient les choses différemment.

Les paléontologues, notamment, ont un peu de mal à admettre les *réalités astronomiques*, pourtant incontestables souvent. Ainsi le paléontologue Claude Babin, dans son livre *Autour du catastrophisme* (3), trouve que les astronomes en rajoutent un peu. Il explique :

“ Il convient de ne pas sombrer dans les excès inverses de ceux d'un actualisme strict, ce dont semblent quelquefois nous menacer une certaine forme du néocatastrophisme et ses effets de mode. Combes écrit ainsi de façon quelque peu brutale que “*le catastrophisme est la règle, partout, toujours. Cette vérité essentielle [...] sera l'un des nouveaux dogmes scientifiques du XXI^e siècle*”. L'impactisme pourrait bien, en effet, nous fournir des exemples déroutants d'un réel dogmatisme. On paraît être passé quelquefois d'une ancienne impactophobie à une véritable impactomanie. [...] Impactisme et catastrophisme poursuivent, on le voit, un spectaculaire envahissement dans divers milieux scientifiques, revêtant parfois un certain aspect de tarte à la crème... ” (4)

Une nouvelle vision du monde se dessine

Paradoxalement, je suis nettement moins optimiste, trente ans après avoir écrit la première version de ce livre. Les très nombreuses découvertes récentes (plus de 800 nouveaux NEA par an désormais) inquiètent, le danger potentiel semble plus réel, plus proche aussi. Il est une réalité à l'échelle historique. On comprend mieux aujourd'hui que le catastrophisme d'origine cosmique s'impose comme un moyen *universel naturel* et incontournable de *régulation* de la matière cosmique, sous toutes ses formes, et de la vie, et cela à un *niveau galactique*, donc totalement surhumain.

Même si le *Spaceguard survey* mis en place était une nécessité impérative (contrairement à ce que croient encore et proclament des irresponsables, qui ne voient pas plus loin que le très court terme, et des antimilitaristes primaires) et permettra peut-être de retarder provisoirement l'échéance d'un impact sérieux et de ses conséquences humaines totalement incalculables, l'avenir paraît bien sombre. L'homme devra être très vigilant et imaginatif pour le contrôler et le maîtriser. Ne serait-ce pas mission impossible ?

Surtout depuis que les astronomes (et les militaires) ont compris que l'introduction dans le Système solaire intérieur d'objets de plus de 100 km de diamètre, comme les centaures issus de la ceinture de Kuiper, était quasiment inéluctable plusieurs fois par million d'années. L'hypothèse Hephaistos et la fragmentation de l'objet originel en milliers d'éclats ont été une révélation. La Terre, comme les autres planètes, est concernée.

Comme résumé et conclusion, je reprendrai le texte d'une chronique parue en 1993 dans la revue *Observations et Travaux*, publiée par la Société Astronomique de France, et que j'ai écrit avec mon ami et associé belge Jean Meeus (5). Certains lecteurs de cette revue m'ont dit avoir apprécié le caractère visionnaire de ce texte, mais il n'est plus modestement qu'un rappel historique et un aperçu de la réalité de demain.

" SPACEWATCH : UNE NOUVELLE VISION DU MONDE SE DESSINE

Les premiers résultats obtenus à Kitt Peak, avec l'extraordinaire télescope automatique Spacewatch, confirment bien entendu que la Terre est constamment frôlée par une multitude de petits corps célestes. Avec toutes les conséquences qui en découlent. Des impacts d'objets de 100 mètres ou plus sont inévitables à l'échelle du millier d'années. Un impact comme celui de la Tougouska (objet de 80 mètres) pourrait avoir lieu tous les 200 ou 300 ans.

C'est une bonne leçon pour tous ceux qui se sont moqués, un peu à la légère, des "catastrophistes" (qui étaient astronomes ou naturalistes en général, mais aussi astrologues, philosophes, ecclésiastiques ou érudits) qui se sont succédé de l'Antiquité à

nos jours. Certains se sont fourvoyés parfois, certes, faute de connaître comme nous tous ces NEO (Natural Near-Earth Objects, selon l'appellation de l'UAI), ou en se cloisonnant à l'intérieur de schémas (astrologiques parfois, religieux souvent) tout tracés, mais un peu trop exigus. D'autres n'ont pas pu ou pas voulu s'exprimer clairement sur ce sujet ambigu (parce que mêlant science et religion) pour ne pas s'attirer les foudres des autorités religieuses, intransigeantes à certaines époques, ou les sarcasmes de leurs contemporains. Mais tous les "catastrophistes" pressentaient bien que le ciel *réel* était bien plus complexe que le ciel *observé* et qu'il était quasiment inévitable qu'il réserve parfois de mauvaises surprises.

Les deux premiers détonateurs astronomiques vraiment sérieux en ce domaine furent le passage à proximité de la Terre de la comète D/Lexell en 1770 (ce qui donna à réfléchir aux savants clairvoyants de l'époque) et ensuite la découverte d'Eros en 1898 (capitale car elle *prouvait* l'existence d'astéroïdes pouvant s'approcher de la Terre). Mais jusqu'aux découvertes d'Apollo, d'Adonis et d'Hermès, dans les années 1930, la théorie de *l'impactisme terrestre*, plus généralement appelée *catastrophisme d'origine cosmique*, a toujours eu une connotation nettement péjorative, et elle était restée marginale, faute de preuves *terrestres* suffisamment probantes.

Il ne faut jamais perdre de vue que jusqu'en 1803 (avec l'averse météoritique de l'Aigle dans l'Orne, observée en plein jour par plusieurs centaines de témoins, qui *obligea* à une déchirante volte-face), c'est *l'existence même* des météorites qui était contestée, et celle des cratères météoritiques terrestres l'a été jusqu'au début des années 1950. On croit rêver devant tant d'inutiles retards et de tergiversations incompréhensibles pour des chercheurs actuels.

Mais aujourd'hui, en ce début des années 1990, avec les progrès fulgurants dus au télescope Spacewatch, qui nous fait découvrir *un monde nouveau*, le gigantesque *billard cosmique* dans lequel la Terre évolue, nous sommes vraiment passés à la vitesse supérieure. Et quand ce seront une dizaine de télescopes automatiques qui surveilleront le ciel (dans le cadre du *Spaceguard Survey* dont Spacewatch est le premier maillon), et qui mettront en évidence des centaines d'approches serrées par mois à la Terre et l'existence de nombreux astéroïdes *sur des orbites de collision*, la moquerie et l'incompréhension liées au catastrophisme risquent de laisser place à l'inquiétude.

Depuis quinze ans, on parle beaucoup de la fin des dinosauriens, il y a environ 65 millions d'années, due à l'impact d'un astéroïde ou d'une comète. Mais il serait temps maintenant

d'aller plus loin et de tenter d'élucider les autres grands cataclysmes du passé. Il y a énormément à faire dans ce domaine, notamment en associant plus étroitement extinctions de masse et astrolèmes géants, eux-mêmes consécutifs à des impacts d'EGA ou de comètes de plusieurs kilomètres de diamètre. Il paraît indispensable surtout d'étudier sous tous ses aspects l'impact (peut-être double) de grande envergure qui a eu lieu il y a environ 700 000 ans et qui est associé à la création des millions d'australasites, les plus récentes des tectites (via le cratère météoritique fantôme de Wilkes Land en Antarctique ?) et à la dernière inversion du champ magnétique terrestre. Des surprises de taille nous attendent et la réalité pourrait bien dépasser la fiction ! Car il ne s'agit plus d'une extinction de masse, comme notre planète en a connu quelques-unes au cours de son histoire mouvementée, mais d'un épisode récent et important de *l'évolution* de la vie (du fait des radiations et des *mutations* qui s'ensuivirent subies par de nombreuses espèces, parmi lesquelles les ancêtres de l'homme actuel). Il n'est plus possible aujourd'hui de nier la corrélation : mort des dinosauriens - émergence des primates et des conséquences qui en découlent, mais ce n'était là qu'une étape parmi d'autres.

On en revient toujours aux conséquences de l'impactisme terrestre, sous ses deux formes essentielles : *macroscopique* (gros impacts) et *particulaire* (radiations diverses), qui semblent faire peur à certains chercheurs. Qu'on le veuille ou non, le catastrophisme d'origine cosmique (qui n'a rien à voir avec le catastrophisme d'origine "divine" ou un créationnisme étriqué, et qui sont même antinomiques) sera l'une des grandes théories scientifiques du siècle prochain. Il y a là un beau challenge pour les jeunes chercheurs qui veulent faire table rase des idées préconçues... et fausses. A eux de démontrer définitivement que l'impactisme terrestre est bel et bien *l'un des moteurs essentiels de l'évolution*. Une vraie révolution culturelle qui mettra fin à une "guéguerre" d'un autre âge : catastrophisme *contre* uniformitarisme. Il est bien clair qu'il faudra parler de catastrophisme *et* uniformitarisme.

Le télescope Spacewatch pourrait bien être un nouveau détonateur décisif. Ses résultats vont obliger en effet ces prochaines années les scientifiques sceptiques (il en reste bien sûr) à envisager enfin le monde d'une manière différente, plus proche de la réalité. Il leur faudra admettre que nous vivons *dans un univers cataclysmique*, aussi bien dans notre bras galactique (avec les explosions d'étoiles qui redistribuent la matière, mais aussi l'énergie sous forme de particules), que localement dans le Système solaire (avec les caprices épisodiques du Soleil et l'impact des astéroïdes et des comètes) ou même chez nous, sur la Terre (avec les ouragans, les

séismes, les éruptions volcaniques et notre atmosphère parfois perméable aux radiations nocives).

Un monde nouveau finira par s'imposer, un monde où le *cataclysmes est la règle*, PARTOUT, TOUJOURS. La vie a dû obligatoirement s'accommoder de ces soubresauts épisodiques, violents, irréversibles. La double conclusion est claire pour les catastrophistes modernes : l'homme, sous sa forme actuelle, n'est qu'un phénomène récent, *transitoire*, et la vie si elle existe ailleurs, ne peut être que très différente de celle qui a *pris racine* (peut-être par panspermie), puis *évolué* sur Terre. Dur à admettre pour ceux qui ignorent tout de l'astronomie, et pour ceux qui s'accrochent désespérément, par le biais du créationnisme, aux certitudes bibliques. Inacceptable même !

Il n'est pas étonnant, par contre, que les spécialistes des astéroïdes et des comètes (et plus généralement la communauté astronomique) soient de plus en plus partisans des idées catastrophistes. Ils sont les premiers à savoir que les collisions sont inévitables. Et ce n'est pas la découverte, à un mois d'intervalle, de 1993 HD et 1993 KA2, les deux premiers EGA connus à être sur des orbites de quasi-collision avec la Terre, qui risque de les faire changer d'avis, même s'il s'agit là de deux objets minuscules sans danger pour notre planète.

Ils savent que Spacewatch, et bientôt ses homologues prévus dans le cadre du *Spaceguard Survey*, vont nous faire entrer dans une ère nouvelle et passionnante. Mais il est bien clair que les astronomes ne peuvent, à eux seuls, comprendre et résoudre le problème du catastrophisme d'origine cosmique dans sa globalité. Seule une vaste campagne d'études multidisciplinaires peut permettre des progrès vraiment décisifs sur la connaissance du *passé*, le pourquoi du *présent* et la manière de gérer un *avenir* incertain et un peu inquiétant quand même à long terme.

Même les militaires américains commencent à leur manière à s'intéresser à ce futur, en travaillant sur les techniques à développer pour se débarrasser (principalement par destruction dans l'espace ou par changement d'orbite) d'éventuels objets trop dangereux. C'est un nouvel épisode pacifique de la "guerre des étoiles" et un recyclage imprévu pour un arsenal nucléaire privé de ses objectifs terrestres familiers. Il est cocasse d'imaginer que la survie de l'humanité tiendra peut-être à l'existence de cet arsenal, prévu à l'origine pour une tout autre utilisation, et qui est voué aux gémonies par ceux qui, au contraire, sont toujours persuadés qu'il va entraîner sa perte. Mais nous n'en sommes pas encore là.

Et surtout, il ne faut pas oublier que *l'homme et l'univers ne cohabitent pas dans une même échelle de temps*. L'homme aura disparu depuis longtemps que la Terre subira encore (et toujours) des agressions du cosmos. C'est une autre confirmation de ce catastrophisme renaissant : l'homme ne représente vraiment pas grand-chose dans l'espace et dans le temps, tout juste un épiphénomène passager extrêmement marginal. On est bien loin de l'époque précopernicienne où la Terre était encore le centre du monde et l'homme le but ultime de la Création ! La science est impitoyable... ” (6)

Cette chronique qui date de 1993 reste tout à fait d'actualité quasiment vingt ans plus tard. Comme je l'ai dit, plus de 800 nouveaux NEA sont découverts chaque année. En 1994, on a découvert le premier objet de plus de 1 km de diamètre (1994 PC1) qui oscille constamment entre une orbite de quasi-collision et de collision avec la Terre. En 1997, on a découvert le fameux astéroïde 1997 XF11, de plus de 1 km de diamètre également, que l'on a annoncé menaçant pour le 26 octobre 2028. Bien qu'il n'y ait pas de collision actuellement prévue au XXI^e siècle, de tels PHA (*Potentially Hazardous Asteroids*, astéroïdes potentiellement dangereux, je le rappelle) de taille kilométrique restent très dangereux pour notre planète à moyen terme, et l'on sait aussi que de nombreux autres objets analogues restent à découvrir. Toutatis, Oljato, Nereus, Hermes, Adonis, Castalia, 1994 PC1, 1997 XF11, Apophis, autant de noms déjà bien familiers aux spécialistes, autant d'objets menaçants pour la Terre à moyen terme.

La vie terrestre n'est pas un jeu, elle est pourtant issue et tributaire d'un jeu gigantesque qui se pratique à l'échelle galactique : *le billard cosmique*. Etoiles, planètes, comètes, astéroïdes et poussières en sont les différents acteurs et la gravitation universelle impose ses règles à tous, sans se préoccuper des conséquences.

Informers, à défaut de convaincre

Tout au long de ce livre, je me suis appuyé sur des centaines de livres et d'articles de chercheurs, actuels mais aussi plus anciens. Je leur dois beaucoup, évidemment, et je tiens pour terminer à leur rendre hommage. Comme je l'ai expliqué, ce livre est une simple étape, un jalon, après beaucoup d'autres et avant beaucoup d'autres.

Il est bien évident que je ne formulerai aucune critique sur le travail des Anciens, au contraire, même si l'on a du mal parfois à comprendre aujourd'hui certains retards et le pourquoi de verrous psychologiques qui paraissent abusifs, leurs travaux sont le socle des connaissances actuelles. Platon, Whiston, Laplace, Cuvier et tous les autres savants catastrophistes du passé ou actuels ont cherché et cherchent encore, chacun selon ses moyens et les connaissances de son époque, à informer et à faire comprendre à leurs contemporains que la vie terrestre est tributaire de phénomènes physiques extérieurs qui les dépassent de beaucoup.

La tâche est assez difficile car l'humanité actuelle, dans sa grande majorité, tout comme celle des siècles précédents, a peur de l'avenir et refuse instinctivement tout ce qui a trait au cataclysme. Beaucoup préfèrent l'irrationnel, à commencer par l'astrologie, à la réalité scientifique. Certains préfèrent *se faire peur* avec des alignements planétaires imaginaires et un millénarisme absurde, et qui n'est rien d'autre qu'un fantasme, plutôt que de regarder la réalité en face.

Le devoir des chercheurs actuels est d'informer, encore et toujours, à défaut de convaincre. De nombreux livres sont parus sur le problème des cataclysmes d'origine cosmique depuis une dizaine d'années (voir la bibliographie), c'est une très bonne chose. Il est nécessaire, en effet, que des auteurs de formation et de sensibilité parfois très différentes présentent d'une manière plurielle une réalité que toute personne cultivée se doit de connaître (7). Aux lecteurs de juger ensuite ce qu'ils doivent ou désirent en retenir. De toute manière, au fil des siècles, la réalité scientifique finira par s'imposer, sinon à tous, tout au moins à ceux qui veulent savoir le pourquoi et le comment de leur histoire cosmique.

Notes

1. S. Junca, *Blessure d'étoile. La face cachée de l'évolution*, Édilivre, 2011. Sébastien Junca est l'un des premiers chercheurs qui étudie les rapports entre l'impactisme et le catastrophisme d'origine cosmique et les problèmes philosophiques, psychologiques et religieux. Un livre innovant à lire.

2. *La Terre bombardée*, pp. 251-252.

3. C. Babin, *Autour du catastrophisme*, Vuibert - Adapt, 2005.

4. Citations p. 140.

5. Je tiens ici à remercier l'astronome belge Jean Meeus. Nous avons publié ensemble une quarantaine d'articles sur les astéroïdes et les comètes entre 1974 et 2005. C'est un expert du calcul astronomique mondialement connu. Aujourd'hui octogénaire, il est toujours aussi efficace. Je lui dois beaucoup.

6. M.-A. Combes et J. Meeus, *Chronique des objets AAA (n° 6)*, Observations et Travaux, 35, pp. 20-26, 1993. Citation pp. 24-26.

7. Se cultiver demande un réel effort intellectuel, devant lequel beaucoup reculent. C'est encore plus vrai dans le domaine scientifique. Des proches m'ont dit que mon livre est "*beaucoup trop compliqué*" pour le lecteur moyen, et ont renoncé à le lire, se contentant d'un survol superficiel. Par contre, des lecteurs attentifs m'ont dit leur satisfaction devant la manière dont j'ai traité le sujet. Vouloir faire la liaison entre la science, le mythe et l'histoire, comme j'ai tenté de le faire, leur a paru une démarche riche de promesses et de surprises à venir aussi. Ils veulent connaître le monde dans lequel ils vivent !

BIBLIOGRAPHIE

- Adushkin (V.) and Nemchinov (I.) eds, *Catastrophic events caused by cosmic objects*, Springer, 2007.
- Ager (D.), *The new catastrophism : the importance of rare events in geological history*, Cambridge University Press, 1993.
- Allègre (C.) et Dars (R.), *La géologie. Passé, présent et avenir de la Terre*, Belin - Pour la Science, 2009.
- Allen (D.S.) and Delair (J.B.), *When the Earth nearly died*, Gateway Books, 1995.
- Alvarez (W.), *La fin tragique des dinosaures*, Hachette, 1998.
- Aubert (V.), *Les catastrophes qui nous guettent*, Éditions du Rocher, 2008.
- Babin (C.), *Autour du catastrophisme*, Vuibert - Adapt, 2005.
- Bailey (M.E.), Clube (S.V.M.) and Napier (W.N.) eds, *The origin of comets*, Pergamon Press, 1990.
- Baillie (M.), *Exodus to Arthur. Catastrophic encounters with comets*, Batsford, 1999.
- Baillie (M.), *New light on the black death : The cosmic connection*, Tempus, 2006.
- Barnes-Svarney (P.), *Asteroid : Earth-destroyer or new frontier ?*, Perseus Books, 2003.
- Bauval (R.) et Gilbert (A.), *Le mystère d'Orion*, Pygmalion/Gérard Watelet, 1994.
- Benest (D.) et Froeschlé (C.), *Astéroïdes, météorites et poussières interplanétaires*, Éditions Eska, 1999.
- Berger (A.), *Le climat de la Terre : un passé pour quel avenir ?*, De Boeck-Wesmael, 1992.
- Bobrowsky (P.) and Rickman (H.) eds, *Comet/asteroid impacts and human society, an interdisciplinary approach*, Springer, 2007.
- Boia (L.), *La fin du monde. Une histoire sans fin*, La Découverte, 1999.
- Boura (O.), *Les Atlantides. Généalogie d'un mythe*, Arléa, 1993.
- Bourdeix (B.), *2012 et les fins du monde*, Fetjaine, 2011.
- Brahic (A.), *Enfants du Soleil*, Odile Jacob, 1999.
- Burke (J.G.), *Cosmic debris*, University of California Press, 1986.
- Cahiers du Règne Minéral (collectif), *Les météorites*, n° 1, 2012.
- Capart (A.) et Capart (D.), *L'homme et les déluges*, Hayez, 1986.
- Carion (A.), *Les météorites et leurs impacts*, Masson, 1997.
- Carnac (P.), *L'Atlantide. Autopsie d'un mythe*, Éditions du Rocher, 2001.
- Chapman (C.R.) and Morrison (D.), *Cosmic catastrophes*, Plenum Press, 1989.
- Clube (S.V.M.) ed., *Catastrophes and evolution : astronomical foundations*, Cambridge University Press, 1989.
- Clube (V.) and Napier (B.), *The cosmic serpent*, Faber & Faber, 1982.
- Clube (V.) et Napier (B.), *Hiver cosmique*, Le Jardin des Livres, 2006.
- Combes (M.-A.), *La menace du ciel*, Internet, 1999.
- Combes (M.-A.), *La comète de Whiston*, Internet 2000.
- Combes (M.-A.) et Vincent-Randonnier (A.), *La Terre bombardée 2007*, Internet. (version 3 illustrée de plus de 200 figures).
- Combes (M.-A.), *L'histoire cosmique des hommes*, Internet, 2011.

- Courtillot (V.), *La vie en catastrophes*, Fayard, 1995.
- Courtillot (V.), *Nouveau voyage au centre de la Terre*, Odile Jacob, 2009.
- Cox (D.W.) and Chestek (J.H.), *Doomsday asteroid : can we survive ?*, Prometheus Books, 1996.
- Crick (F.), *La vie vient de l'espace*, Hachette, 1982.
- Crovisier (J.) et Encrenaz (T.), *Les comètes*, Belin/CNRS Éditions, 1995.
- Crozon (M.), *Quand le ciel nous bombarde : Qu'est-ce que les rayons cosmiques ?*, Vuibert, 2005.
- Cuvier (G.), *Discours préliminaire*, Flammarion, 1992.
- de Grazia (A.), *The iron age of Mars*, Metron Publications, 2006.
- Delsemme (A.), *Les origines cosmiques de la vie*, Flammarion, 1994.
- De Wever (P.) et autres, *Le Volcanisme. Cause de mort et source de vie*, Vuibert / MNHN, 2003.
- Dick (S.J.), *The biological universe*, Cambridge University Press, 1996.
- Doressoundiram (A.) et Lellouch (E.), *Aux confins du système solaire*, Belin / Pour la Science, 2008.
- Dumas-Reungoat (Ch.), *La fin du monde. Enquête sur l'origine du mythe*, Les Belles Lettres, 2001.
- Dymock (R.), *Asteroids and dwarf planets and how to observe them*, Springer, 2010.
- Ehrlich (P.R.), Sagan (C.), Kennedy (D.) et Roberts (W.O.), *Le froid et les ténèbres*, Belfond, 1984.
- Festou (M.), Véron (P.) et Ribes (J.-C.), *Les comètes, mythes et réalités*, Flammarion, 1985.
- Firestone (R.), West (A.) and Warwick-Smith (S.), *The cycle of cosmic catastrophes*, Bear & Company, 2006.
- Flem-Ath (R.) ad Flem-Ath (R.), *When the sky fell*, Stoddart, 1995.
- Foucault (A.), *Climatologie et paléoclimatologie*, Dunod, 2009.
- Frankel (C.), *La mort des dinosaures : l'hypothèse cosmique*, Masson, 1996.
- French (B.M.), *Traces of catastrophe*, Lunar and Planetary Institute, 1998.
- Gargaud (M.), Claeys (P.) et Martin (H.) sous la direction de, *Des atomes aux planètes habitables*, P.U. Bordeaux, 2005.
- Gargaud (M.), Martin (H.), Lopez-Garcia (P.), Montmerle (Th.) et Pascal (R.), *Le Soleil, la Terre... la vie*, Belin, 2009.
- Gehrels (T.) ed., *Hazards due to comets and asteroids*, University of Arizona Press, 1994.
- Genuth (S.S.), *Comets, popular culture, and the birth of modern cosmology*, Princeton University Press, 1997.
- Gérardin (L.), *L'Atlantide et les Déluges*, Dervy, 1999.
- Glen (W.) ed., *The mass-extinction debates : how science works in a crisis*, Stanford University Press, 1994.
- Gribbin (J.) and Gribbin (M.), *Fire on Earth*, Simon & Schuster, 1996.
- Grieve (R.A.F.) et autres, *Astronaut's guide to terrestrial impact craters*, NASA, 1988.
- Hancock (G.), *L'empreinte des dieux*, Pygmalion/Gérard Watelet, 1996.
- Hodge (P.), *Meteorite craters and impact structures of the Earth*, Cambridge University Press, 1994.
- Homet (J.-M.), *Le retour de la comète*, Imago, 1985.
- Hoyle (F.) and Wickramasinghe (N.C.), *Diseases from space*, J.M. Dent &

Sons, 1979.

Hoyle (F.) et Wickramasinghe (N.C.), *Le nuage de la vie*, Albin Michel, 1980.

Impey (C.), *The living cosmos*, Cambridge University Press, 2011.

Jamet (D.) et Mottez, 2012, *scénarios pour une fin du monde*, Belin - Pour la Science, 2009.

Jenniskens (P.), *Meteor showers and their parent comets*, Cambridge University Press, 2006.

Junca (S.), *Blessure d'étoile. La face cachée de l'évolution*, Édilivre, 2011.

Kaler (J.B.), *Heaven's touch*, Princeton University Press, 2009.

Lantos (P.), *Le Soleil en face*, Masson, 1997.

LaViolette (P.), *Earth under fire*, Bear & Company, 2005.

Leaky (R.) et Lewin (R.), *La sixième extinction : évolution et catastrophes*, Flammarion, 1997.

Levy (D.H.), *Impact Jupiter : the crash of comet Shoemaker-Levy 9*, Plenum Press, 1995.

Levy (D.H.), *Comets : creators and destroyers*, Simon & Schuster, 1998.

Lewis (J.S.), *Rain of iron and ice*, Addison-Wesley, 1996.

Lilensten (J.) et autres, *Le système solaire revisité*, Eyrolles, 2006.

Luminet (J.-P.), *Astéroïdes : La Terre en danger*, Le cherche-midi, 2012.

Mark (K.), *Meteorite craters*, University of Arizona Press, 1987.

Marsden (B.G.) and Williams (G.V.), *Catalogue of cometary orbits, 16th edition*, Minor Planet Center, 2005.

Maurette (M.), *Micrometeorites and the mysteries of our origins*, Springer, 2006.

Meinesz (A.), *Comment la vie a commencé*, Belin - Pour la Science, 2008.

Melosh (H.J.), *Impact cratering : a geologic process*, Oxford University Press, 1989.

Merlin (J.-C.) et Verdenet (M.), *Les comètes*, Tessier & Ashpool, 1995.

Merlin (J.-C.), *Les astéroïdes*, Tessier & Ashpool, 2003.

Michanowsky (G.), *Le retour de l'étoile de Sumer*, Albin Michel, 1980.

Mobberley (M.), *Hunting and imaging comets*, Springer, 2011.

Monod (Th.) et Zanda (B.), *Le fer de Dieu*, Actes Sud, 1992.

Muck (O.H.), *L'Atlantide. Légendes et réalité*, Plon, 1982.

Muséum National d'Histoire Naturelle (collectif), *Les météorites*, Bordas, 1996.

Nazé (Y.), *L'astronomie des Anciens*, Belin - Pour la Science, 2009.

Newson (L.), *La planète en colère*, Sélection du Reader's Digest, 1999.

Norton (O.R.) and Chitwood (L.A.), *Field guide to meteors and meteorites*, Springer, 2008.

Paccalet (Y.), *Le grand roman de la vie*, JC Lattès, 2009.

Palmer (T.), *Controversy : catastrophism and evolution : the ongoing debate*, Plenum Publishing Corporation, 1999.

Palmer (T.), *Perilous Planet Earth. Catastrophes and Catastrophism through the Ages*, Cambridge University Press, 2003.

Papamarinopoulos (S.T.) ed, *The Atlantis hypothesis : Searching for a lost land*, Heliotopos Publications, 2007.

Poncelet (H.), *Histoire du monde en 7 catastrophes*, Taillandier, 2007.

Pour la Science (collectif), *Les dinosaures*, 1993.

Pour la Science (collectif), *La vie dans l'Univers*, 1994.

Pour la Science (collectif), *L'écorce terrestre*, 1995.

Pour la Science (collectif), *Le chaos*, 1995.

Pour la Science (collectif), *Les origines de l'humanité*, 1999.

Pour la Science (collectif), *Les terres célestes*, 1999.

Pour la Science (collectif), *Les éléments en furie*, 2006.

Pour la Science (collectif), *Où est née la vie ?*, 2008.

Pour la Science (collectif), *Exoplanètes*, 2009.

Primack (J.R.) et Abrams (N.E.), *Destin cosmique*, Robert Laffont, 2008.

Prothero (D.R.), *Catastrophes !*, Johns Hopkins University Press, 2011.

Proust (D.) et Schneider (J.), *Où sont les autres ? A la recherche de la vie dans l'univers*, Seuil, 2007.

Radlof (J.G.), *The shattering of the great planets Hesperus and Phaethon*, Eumetron Publications, 2006.

Raulin-Cerceau (F.) et Bilodeau (B.), *Les origines de la vie - Histoire des idées*, Ellipses, 2009.

Raup (D.M.), *De l'extinction des espèces*, Gallimard, 1993.

Rivkin (A.S.), *Asteroids, comets, and dwarf planets*, Greenwood Press, 2009.

Rohrabacher (D.) ed, *Threat and the opportunity of asteroids and other near earth objects*, Diane Publishing Co, 1998.

Rubtsov (V.), *The Tunguska mystery*, Springer, 2009.

Sagan (C.) et Druyan (A.), *Comète*, 1985.

Sagan (C.) et Turco (R.), *L'hiver nucléaire*, Seuil, 1991.

Schilling (G.), *The hunt for planet X*, Copernic Books, 2009.

Schneider (J.-L.), *Les traumatismes de la Terre*, Société Géologique de France – Vuibert, 2009.

Science & Vie (collectif), *Fin du monde*, 2012.

Seargent (D.), *The greatest comets in history*, Springer, 2009.

Spanuth (J.), *Le secret de l'Atlantide*, Copernic, 1977.

Spencer (J.) and Mitton (J.) eds, *The great comet crash : the impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter*, Cambridge U P, 1995.

Steel (D.), *Rogue asteroids and doomsday comets*, John Wiley & Sons, 1995.

Steyer (S.) et Bénéteau (A.), *La Terre avant les dinosaures*, Belin - Pour la Science, 2009.

Thomas (P.J.), Chyba (C.F.) and McKay (C.P.) eds, *Comets and the origin and evolution of life*, Springer, 1997.

Time-Life (collectif), *Les périodes glaciaires*, 1984.

Time-Life (collectif), *Comètes, astéroïdes et météorites*, 1991.

Velikovsky (I.), *Mondes en collision*, Le Jardin des Livres, 2003.

Velikovsky (I.), *Les grands bouleversements terrestres*, Le Jardin des Livres, 2004.

Verschuur (G.L.), *Impact ! The threat of comets and asteroids*, Oxford University Press, 1996.

Wickramasinghe (J.), Wickramasinghe (C.) and Napier (W.), *Comets and origin of life*, World Scientific, 2009.

Yeomans (D.K.), *Comets : a chronological history of observation, science, myth, and folklore*, John Wiley & Sons, 1991.

Yeomans (D.K.), *Near-Earth Objects : Finding them before they find us*, Princeton University Press, 2012.

SITES INTERNET

1. Sur les NEO, les astéroïdes et les comètes

www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html (l'outil quotidien du spécialiste)
www.minorplanetcenter.org/mpec/RecentMPECs.html (les dernières MPEC)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Unusual.html (le bilan quotidien des astéroïdes particuliers)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Apollos.html (NEA de type Apollo)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Atens.html (NEA de type Aten)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Amors.html (NEA de type Amor)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Dangerous.html (la liste des PHA)
www.hohmanntransfer.com/news.htm (l'actualité avec *Asteroid/Comet Connection*)
neo.jpl.nasa.gov/risk (NEA les plus dangereux actuellement pour la Terre)
newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?objects_list:0;main (tout sur les NEA : orbites, approches, caractéristiques...)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/Closest.html (les très fortes approches des NEA à la Terre)
www.minorplanetcenter.org/iau/lists/CloseApp.html (les fortes approches des NEA passées et futures)
neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/neo_elem?type=PHA (liste du JPL des astéroïdes potentiellement dangereux)
www.brera.mi.astro.it/sormano/sael.html (approches des NEA très faibles)
www.b612foundation.org (site de la B612 Foundation)
www.jpl.nasa.gov/asteroidwatch (site Asteroid watch du JPL)
ssd.jpl.nasa.gov (site Solar System Dynamics du JPL)
www.jpl.nasa.gov/solar_system (le site Solar System du JPL)
nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/asteroidpage.html (National Space Science Data Center)
earn.drl.de (European Asteroid Research Node)
www.nearearthobjects.co.uk (site britannique consacré aux NEO)
neo.jpl.nasa.gov/links (les liens du Near Earth Object Program)
www.anakinovni.org/asteroides.htm (page du site anakinovni.org)
www.minorplanetobserver.com (The Minor Planet Observer and Palmer Divide Observatory)
www.lpl.arizona.edu/impacffects (Earth Impact Effects Program)
cfa-www.harvard.edu/icq/icq.html (toute l'actualité des comètes)
cometography.com (un site clé pour l'étude des comètes)
cometography.com/cometlink.html (liste de liens concernant les comètes)
pagesperso-orange.fr/pgj/periodique.htm (la liste des comètes périodiques numérotées de Gilbert Javaux)
www.comethunter.de (The COCD Homepage = Catalogue Of Comet Discoveries)
smallcomets.physics.uiowa.edu (les comètes minuscules qui heurtent la Terre)
www.theastronomer.org/comets.html (le site des observateurs de comètes)

2. Sur l'impactisme terrestre et planétaire

www4.tpg.com.au/users/horsts/spacegd.html (toute l'actualité avec l'Australian Spaceguard Survey)
impact.arc.nasa.gov (le site impactisme de la NASA)
www.morien-institute.org/impact_craters.html (Terrestrial impact craters caused by asteroids, meteorites and cometary debris)
abob.libs.uga.edu/bobk/cccmenu.html (l'actualité 1997-2003 du Cambridge Conference Network)
www.spaceguarduk.com (Spaceguard UK Portal and CAIN : Comet & Asteroid Information Network)
[Tunguska Home Page](#) (site consacré à l'événement de la Tunguska)
[Tunguska Comet Impact - 1908](#) (le site du centenaire de l'événement)
www.torinoscale.com (tout sur l'échelle de Turin)
www.unb.ca/passc/ImpactDatabase (le répertoire complet des astroblièmes)
www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/craters/crater_index.shtml (Terrestrial Impact Craters - Lunar and Planetary Institute)
www.barringercrater.com (site du Meteor Crater)
meteor.pwnet.org/index.htm (site concernant The Chesapeake Meteorite)
www.chiemgau-impact.com (site concernant The Chiemgau impact)
www.falw.vu/~smit/home_smit.html (site du géologue Jan Smit)
gaiashield.com (GaiaShield - The Sky Is Falling Now !)
star.arm.ac.uk/impact-hazard (site de l'Observatoire d'Armagh)

3. Sur les relations Terre-Soleil, l'impactisme particulière, les météores, les météorites et l'astrobiologie

spaceweather.com (toute l'actualité)
www.sec.noaa.gov (National Oceanic and Atmospheric Administration)
www.obs-nice.fr/vigouroux (thèse de Anne Vigouroux : *Etude de la variabilité solaire à long terme*)
asima.seti.org (site de la mission ASIMA = ASteroid IMPact Analyzer)
www.amsmeteors.org (site de l'American Meteor Society)
www.imo.net (site de l'International Meteor Organization)
www.meteoriticalsociety.org (site de la Meteoritical Society)
www.meteorlab.com (site de New England Meteoritical)
www.meteoritica.com/index.htm (site Meteoritica)
geology.cwru.edu/~ansmet (site de l'ANSMET = The Antarctic Search for Meteorites)
www.nirgal.net (le site de la planète Mars et des météorites martiennes)
www.sievert-system.org (sur le danger des radiations cosmiques)
www.astrobiology.com (l'un des sites clés sur l'astrobiologie)
astrobiology.arc.nasa.gov (l'un des sites clés sur l'astrobiologie)
astrobio.net/news (le site d'Astrobiology Magazine)

4. Sur les catastrophes terrestres, le catastrophisme et le néo-catastrophisme

cosmictusk.com (site The Cosmic Tusk)
www.pbs.org/wgbh/nova (site NOVA de Public Broadcasting Service)
www.geolsoc.org.uk (site de la Geological Society)
inside.bard.edu/specialproj/clas214 (site *Catastrophe / Apocalypse* de William Mullen)
atlantides.free.fr (étude concernant l'Atlantide)
racines.traditions.free.fr/atlatia/index.htm (étude sur l'Atlantide boréenne)
racines.traditions.free.fr/deluges/index.htm (étude concernant les déluges)
georgehoward.net/cbays.htm (site sur les *Carolina Bays*)
www.atlantisquest.com (site *Quest for Atlantis* de Cedric Leonard)
tsun.sccc.ru/hiwg/hiwg.htm (site de l' *Holocene Impact Working Group*)
atlantis2008.conferences.gr/atlantis2008-links.html (différents sites consacrés aux atlantides)
AtlantisArchives.org (autre site et hypothèses sur le continent disparu)
abob.libs.uga.edu/bobk (site de Bob Kobres)
abob.libs.uga.edu/bobk/cbaymenu.html (infos sur les *Carolina Bays*)
pibburns.com (site de Pib Burns)
personal.eunet.fi/pp/tilmari/tilmari.htm (site de Tino Niroma)
www.grazian-archive.com (The Alfred de Grazia Archive)
www.grazian-archive.com/quantavolution/QuantaSeries.htm (Complete works in quantavolution and catastrophe)
www.morien-institute.org (néo-catastrophisme et archéoastronomie)
www.etheric.com (site *Sphinx Stargate* de Paul LaViolette)
isole.ecn.org/cunfi/spedicgalact.pdf (article d'Emilio Spedicato)
www.flem-ath.com (site de Rand and Rose Flem-Ath)
www.barry.warmkessel.com (Vulcan, comets and the impending catastrophe)
www.realclimate.org/index (le site RealClimate)
www.thelivingweb.net/disasters_and_catastrophes.html (site Disasters and Catastrophes)
www.knowledge.co.uk/sis (site clé concernant le néo-catastrophisme)
dailygrail.com (site d'information : The Daily Grail)
www.futurquantiquee.org (Les Signes des Temps - Catastrophes cycliques)
www.robertbauval.co.uk (site de Robert Bauval)
www.world-mysteries.com (site de World Mysteries)
www.archaeoastronomy.com (site concernant l'archéoastronomie)
www.henry-davis.com/MAPS (sur les anciennes cartes géographiques)
www.catastrophism.com/intro/index.php (site sur le catastrophisme)
www.panspermia.org (*Cosmic Ancestry*, site sur la science de la Création)
www.answersincreation.org/index.htm (*Answers In Creation*, l'un des sites de la science de la Création)
www.sacred-texts.com/index.htm (Internet Sacred Text Archive)

sur le site internet de l'auteur : LA MENACE DU CIEL
<http://astrosurf.com/macombes/>

5. Documents consultables

pages NEO et Impactisme et catastrophisme

équivalences magnitudes absolues **H** et diamètres **d** des astéroïdes
liste des NEA numérotés (Near Earth Asteroids)
liste des PHA numérotés (Potentially Hazardous Asteroids)
renseignements sur les découvertes
renseignements sur les noms
progression du nombre de NEA
progression du nombre de PHA
définition des types et sous-types
distribution des NEA numérotés par types et sous-types
palmarès des découvreurs depuis 10 ans
membres possibles de la famille Hephaitos
membres possibles de la famille Heracles
tableau de l'énergie d'impact des astéroïdes
tableau de l'énergie d'impact des comètes
la rencontre d'Ogdy avec la Terre en juin 1908
l'énergie d'impact des astéroïdes
l'énergie d'impact des comètes
et d'autres tableaux et figures avec légendes

6. Reproduction de textes anciens

à partir de la page d'accueil

A NEW THEORY OF THE EARTH de William Whiston
LA LETTRE SUR LA COMÈTE de Maupertuis
RÉFLEXIONS SUR LES COMÈTES de Jérôme Lalande
LA FIN DU MONDE de Camille Flammarion
LE SYSTÈME DU MONDE (tome 1) de Pierre Duhem

7. LA TERRE BOMBARDÉE 2007

Version 3 illustrée de plus de 200 figures
publiée avec le concours d' Axel Vincent-Randonnier

**La version 2012 de *La Terre bombardée* ne remplace pas celle-ci,
plus complète avec une très importante illustration,
mais il était indispensable d'actualiser certaines données
et de tenir compte de nouvelles découvertes et hypothèses.**

INDEX DES NOMS

Les numéros indiqués sont ceux des chapitres où ils apparaissent
(les noms utilisés uniquement dans les notes ne sont pas repris ici)
(souvent la spécialité indiquée n'est que l'une parmi d'autres)

- ABBOTT Dallas, géophysicienne américaine, 19.
ABRAHAM (XIX^e siècle av. J.-C.), patriarche biblique, 2, 18.
AGASSIZ Louis (1807-1873), naturaliste suisse puis américain, 4.
ALDRIN Edwin (1930), astronaute américain, 20.
ALVAREZ Luis (1911-1988), physicien américain, intro, 12, 15, 16, 19.
ALVAREZ Walter (1940), géologue américain, intro, 12, 15, 16.
AMENMÈS (XIII^e-XII^e siècle av. J.-C.), pharaon égyptien, 19.
ANAXIMANDRE (610-547), astronome grec, 1.
ARAGO François (1786-1853), astronome français, avant-propos, 16.
ARISTARQUE de SAMOS (310-230), astronome grec, 1, 3.
ARISTOTE (384-322), philosophe grec, 1, 7, 10, 18.
ARMSTRONG Neil (1930-2012), astronaute américain, 20.
ARNOULD Jacques (1961), historien des sciences français, 2.
ARRHENIUS Svante (1859-1927), physicien suédois, 14.
ASARO Frank (1953), chimiste nucléaire américain, 12.
ASHER David (1966), astronome britannique, 4, 10.
ASTAPOVICH Igor (1908-1976), astronome soviétique, 9.
ATLURI Chandra, géophysicien américain, 9.
AVIEZER Nathan, physicien israélien, 2.
- BAADE Walter (1893-1960), astronome américain, 4.
BABIN Claude, paléontologue français, conclusion.
BADA Jeffrey, biochimiste américain, 12.
BAILEY Mark, astronome britannique, 4.
BAILLIE Mike, paléoécologiste britannique, 19.
BAILLY Jean Sylvain (1736-1793), astronome français, 3.
BARBIERO Flavio (1942), amiral et érudit italien, 19.
BARRINGER Daniel Moreau (1860-1929), géologue américain, 11.
BARUCCI Antonella (1957), astronome italienne, 17.
BAUVAL Robert (1948), ingénieur britannique, 19.
BERLITZ Charles (1914-2003), écrivain américain, 19.
BERNARD Étienne, climatologue belge, 13.
BERNARD Jean-Louis (1918-1998), écrivain français, 19.
BÉROSE (v. 330-v. 260), astronome babylonien, 1.
BERTHELOT Marcellin (1827-1907), chimiste français, 14.
BERZELIUS Jons (1779-1848), chimiste suédois, 14.
BESSEL Friedrich (1784-1846), astronome allemand, 17.
BIELA Wilhelm von (1782-1856), astronome autrichien, 7.
BIERMANN Ludwig (1907-1986), astrophysicien allemand, 7, 8.
BINZEL Richard (1958), astronome américain, 4.
BIOT Jean-Baptiste (1774-1862), physicien français, 3, 14.
BLUMENBACH Johann (1752-1840), naturaliste allemand, 3.
BOHOR Bruce, géologue américain, 12.

BOSLER Jean (1878-1973), astronome français, 2, 17.
 BOURA Olivier (1962), historien français, 18.
 BOURGEOIS Joanne, géologue américaine, 12.
 BOYNTON William (1944), planétologue américain, 12.
 BRACK André (1938), chimiste français, 14.
 BRAHE Tycho (1546-1601), astronome danois 3, 5.
 BROWN Hugh Auchincloss (1879-1975), ingénieur américain, 13.
 BRUNO Giordano (1548-1600), philosophe italien, 3.
 BUCAILLE Maurice (1920-1998), érudit français, 19.
 BUFFON (1707-1788), naturaliste français, 2, 3, 5, 13.
 BURNET Thomas (1635-1715), géologue britannique, 3.

CALAME Odile, astronome française, 20.
 CAMARGO Antonio, géologue mexicain, 12.
 CAMERON Alastair (1925-2005), astronome américain, 13.
 CAPART André (1914-1991), océanographe belge, 18.
 CAPART Denise (1918-2011), ethnologue belge, 18.
 CARUSI Andrea (1946), astronome italien, 4.
 CASSIDY William, météoricien américain, 10.
 CASSINI Jean-Dominique (1625-1712), astronome français, 5.
 CHAPTAL Jean (1756-1832), chimiste français, 3.
 CHARLOIS Auguste (1864-1910), astronome français, 6.
 CHEN Wan, astronome américain, 16.
 CHERNYKH Ludmila (1935), astronome russe, 7.
 CHLADNI Ernst (1756-1827), physicien allemand, 3.
 CLAIRAUT Alexis (1713-1765), mathématicien français, 3.
 CLARKE Alvan (1804-1887), opticien américain, 17.
 CLARKE Arthur (1917-2008), écrivain britannique, intro.
 CLÉOMÈDE (I^{er} siècle av. J.-C.), astronome grec, 1.
 CLUBE Victor (1934), astronome britannique, 4, 7, 10, 19.
 COMBES Michel-Alain (1942), astronome français, conclusion.
 COPERNIC Nicolas (1473-1543), astronome polonais, 3.
 COURTILOT Vincent (1948), géophysicien français, 12.
 COURTY Marie-Agnès, géologue française, 19.
 COWAN Clyde (1919-1974), physicien américain, 9.
 CRICK Francis (1916-2004), biologiste britannique, 14, 15, 16, 17, 19.
 CUVIER Georges (1769-1832), naturaliste français, intro, 3, 13, 19, conclusion.

DACHILLE Frank (1917-1983), astronome américain, 13.
 DARWIN Charles (1809-1882), naturaliste anglais, 11, 15.
 DAVIS Donald (1939), astronome américain, 13.
 DAVIS Marc, astronome américain, 16.
 de GRAZIA Alfred (1919), érudit américain, 19.
 DELPORTE Eugène (1882-1955), astronome belge, 4, 6.
 DELSEMME Armand (1918), astronome américain, 14, 16.
 DÉMOCRITE (v. 460-v. 370), philosophe grec, 1.
 DESCARTES René (1596-1650), philosophe français, 3, 10.
 DIETZ Robert (1914-1995), géophysicien américain, 11.

DIODORE de Sicile (90-20), historien grec, 18.
 DONN Bertram, astronome américain, 7.
 DONNELLY Ignatius (1831-1901), écrivain américain, 19.
 DUHEM Pierre (1861-1916), philosophe français, 1, 18.
 DUMAS-REUNGOAT Christine (1966), historienne française, 1.

 EHRICKE Krafft (1917-1984), ingénieur américain, 20.
 EINSTEIN Albert (1879-1955), physicien américain, 13.
 ÉLAGABAL (204-222), empereur romain, 10.
 ELREDGE Niles (1943), paléontologue américain, 15.
 EMILIANI Cesare (1922-1995), géologue américain, 19.
 ENCKE Johann Franz (1791-1865), astronome allemand, 7.
 EPHORUS (IV^e siècle av. J.-C.), historien grec, 7.
 ÉPICURE (341-270), philosophe grec, 1.
 EUGSTER Jakob (1891-1974), physicien suisse, 16.
 EURIPIDE (480-406), poète grec, 1.
 EVANS Arthur John (1851-1941), archéologue anglais, 18.
 EVERHART Edgar (1920-1990), astronome américain, 7.

 FERMI Enrico (1901-1954), physicien italien, 14.
 FESENKOV Vassili (1889-1972), astronome soviétique, 9.
 FLAMMARION Camille (1842-1925), astronome français, avant-propos, 2, 16.
 FORSTER Thomas (1789-1850), médecin anglais, 16.
 FOUQUÉ Ferdinand (1828-1904), minéralogiste français, 18.
 FRANK Louis, astronome américain, 6.
 FROST Kingdon (1877-1914), archéologue britannique, 18.

 GALILÉE (1564-1642), physicien italien, 3, 5, 7.
 GALLANT René (1906-1985), ingénieur belge, 11.
 GALLI Menotti (1922-2011), physicien italien, 9.
 GANAPATHY Ramachandran, astronome indien, 9.
 GEBALLE Thomas (1944), astronome américain, 14.
 GEHRELS Neil (1952), astrophysicien américain, 16.
 GEHRELS Tom (1925-2011), astronome américain, 4, 6.
 GERARD André-Marie (1918-1989), théologien français, 2.
 GERVAIS de Canterbury (XII^e siècle), moine anglais, 20.
 GILBERT Grove Karl (1843-1918), géologue américain, 11.
 GLASS Bill (1941), géologue américain, 13.
 GOETHE Johann Wolfgang von (1749-1832), écrivain allemand, 3.
 GOFFIN Edwin, astronome belge, 6.
 GOHAU Gabriel (1934), géologue français, 3.
 GOMBOSI Tamas, physicien américain, 7.
 GOULD Stephen Jay (1941-2002), paléontologue américain, 3, 12, 14, 15, 20.
 GRIAULE Marcel (1898-1956), ethnologue français, 17.
 GUM Colin (1924-1960), astronome australien, 8.

HALDANE John (1892-1964), biologiste indien, 14, 16.
 HALLEY Edmond (1656-1742), astronome anglais, 2, 3, 7.
 HAMMER W., chimiste autrichien, 19.
 HANCOCK Graham (1951), écrivain britannique, 19.
 HAPGOOD Charles H. (1904-1982), géologue américain, 13, 19, 20.
 HARTMANN Johannes (1865-1936), astronome allemand, 8.
 HARTMANN William (1939), astronome américain, 13.
 HARTUNG Jack, astronome allemand, 20.
 HEEZEN Bruce (1924-1977), océanographe américain, 13.
 HELFENZRIEDER Johann (1724-1803), astronome allemand, 7.
 HELIN Eleanor (1932-2009), astronome américaine, 6.
 HÉRACLITE (v. 550-v. 480), philosophe grec, 1.
 HÉRODOTE (v. 484-v. 420), historien grec, 18.
 HERSCHEL William (1738-1822), astronome anglais, 3.
 HERTZ Heinrich (1857-1894), physicien allemand, 8.
 HÉSIODE (VIII^e siècle av. J.-C.), poète grec, 1, 19.
 HEVELIUS (1611-1687), astronome allemand, 3, 5.
 HEWISH Antony (1924), astrophysicien britannique, 17.
 HIBBEN Frank (1910-2002), archéologue américain, 19.
 HILDEBRAND Alan (1955), géologue canadien, 12.
 HIPPARQUE (v. 190-v. 126), astronome grec, 17.
 HIRAYAMA Kiyotsugu (1874-1843), astronome japonais, 6.
 HOLBACH baron d' (1723-1789), philosophe français, 3.
 HOMÈRE (IX^e siècle av. J.-C.), poète grec, 1, 19.
 HOMET Jean-Marie, historien français, 7.
 HÖRBIGER Hans (1860-1931), cosmologiste autrichien, 17.
 HOUPIS Harry, astronome américain, 7.
 HOWARD Edward (1774-1816), chimiste anglais, 3.
 HOYLE Fred (1915-2001), astrophysicien britannique, 8, 10, 14, 16, 19.
 HSÜ Kenneth (1929), géologue suisse, 12.
 HUMBOLDT Alexander von (1769-1859), naturaliste allemand, 8.
 HUT Piet, astronome américain, 16.
 HUTTON James (1726-1797), géologue écossais, 3.
 HUYGENS Christiaan (1629-1695), astronome hollandais, 3.

JACKSON Albert, physicien américain, 9.
 JAEGER Jean-Jacques, paléontologue français, 15.
 JANSKY Karl (1905-1950), ingénieur américain, 8.
 JEANS James (1877-1946), astronome anglais, 5.
 JEWITT David (1958), astronome américain, 7.
 JOSUÉ (XIII^e-XII^e siècle av. J.-C.), successeur de Moïse, 2, 10, 19.

KAISER Peter (1924), ingénieur autrichien, 13.
 KANT Emmanuel (1724-1804), philosophe allemand, 5.
 KAZANTZEV Alexandre (1906-2002), ingénieur soviétique, 9.
 KELLER Werner (1909-1980), historien allemand, 18.
 KELLY Allan, astronome américain, 13.
 KEPLER Johannes (1571-1630), astronome allemand, 3, 5, 7, 8, 12.

KIRKWOOD Daniel (1814-1895), astronome américain, 7.
 KIRSCHVINK Joseph, géophysicien américain, 13.
 KIUCHI Tsuruhiko (1954), astronome japonais, 7.
 KLOOSTERMAN Johan Bert (1931), géologue néerlandais, 19.
 KOWAL Charles (1940-2011), astronome américain, 7.
 KRESAK Lubor (1927-1994), astronome slovaque, 7, 9.
 KREUTZ Heinrich (1854-1907), astronome allemand, 7.
 KRINOV Evgeny (1906-1984), météoricien soviétique, 9.
 KRISTAN-TOLLMANN Edith (1934-1995), paléontologue autrichienne, 19.
 KUGLER Franz-Xavier (1862-1929), historien allemand, 17.
 KUIPER Gerard Peter (1905-1973), astrophysicien américain, 7.
 KULIK Leonid (1883-1942), minéralogiste soviétique, 7, 9.
 KYTE Frank, géochimiste américain, 13.

LA COTARDIÈRE Philippe de (1949), écrivain français, 17.
 LACROIX Alfred (1863-1948), minéralogiste français, 17.
 LALANDE Jérôme (1732-1807), astronome français, 3.
 LAMARCK (1744-1829), naturaliste français, 3.
 LANGRENUS (1600-1675), astronome belge, 5.
 LAOUPHI Amanda (1968), archéologue catastrophiste grecque, 19.
 LAPLACE Pierre Simon (1749-1827), mathématicien français, 3, 5, 13, conclusion.
 LASKAR Jacques (1955), astronome français, 5, 13.
 LAUBENFELS Max de (1894-1960), paléontologue américain, 12.
 LAVIOLETTE Paul (1948), astronome américain, 19.
 LAVOISIER Antoine Laurent de (1743-1794), chimiste français, intro.
 LEAKEY Louis (1903-1972), préhistorien anglais, 15.
 LEIBNIZ Gottfried (1646-1716), philosophe allemand, 3.
 LEMAÎTRE Georges (1894-1966), astrophysicien belge, 2.
 LE VERRIER Urbain (1811-1877), astronome français, 10.
 LEVY David (1948), astronome américain, 5.
 LEXELL Anders (1740-1784), astronome russe, 3.
 LIAIS Emmanuel (1826-1900), astronome français, 16.
 LILLY Willard (1908-1980), chimiste américain, 9.
 LINNÉ Carl von (1707-1778), naturaliste suédois, 3.
 LOEWY Maurice (1833-1907), astronome français, 5.
 LONGO Giuseppe, physicien italien, 9.
 LOVELOCK James (1919), biologiste anglais, 16.
 LUCRÈCE (98-55), poète latin, 1, 14.
 LUU Jane (1963), astronome américaine, 7.
 LYELL Charles (1797-1875), géologue écossais, 3, 15.
 LYTTLETON Raymond (1911-1995), astronome britannique, 8.

MARCHAL Christian (1939), ingénieur français, 20.
 MARINATOS Spiridon (1901-1974), archéologue grec, 18.
 MARSDEN Brian (1937-2010), astronome britannique, 5, 7, 17.
 MAUNDER Walter (1851-1928), astronome britannique, 20.
 MAURETTE Michel, météoricien français, 10, 14.
 MAURY Alain (1958), astronome français, 6, 17.

MAXWELL James (1831-1879), physicien écossais, 8.
 McNAUGHT Robert (1956), astronome australien, 7.
 MEEUS Jean (1928), astronome belge, 17, conclusion.
 MELOSH Jay (1947), géophysicien américain, 20.
 MÉNÈS (vers -3300), pharaon égyptien, 19.
 MERENPTAH (XIII^e siècle av. J.-C.), pharaon égyptien, 19.
 MESSIER Charles (1730-1817), astronome français, 3.
 MÉTON (v. 430 av. J.-C.), astronome grec, 1.
 MICHANOWSKY George (1920-1993), archéologue américain, 17.
 MICHEL Helen, chimiste nucléaire américaine, 12.
 MILANKOVIC Milutin (1879-1958), astronome serbe, 13, 16, 18.
 MILLER Stanley (1930-2007), chimiste américain, 14.
 MILLER William (1782-1849), prophète américain, 2, 3.
 MOÏSE (XIII^e siècle av. J.-C.), patriarche biblique, 2, 19.
 MONOD Théodore (1902-2000), naturaliste français, 11, 17.
 MUCK Otto (1892-1956), ingénieur autrichien, 19.
 MULHOLLAND Derral, astronome américain, 20.
 MULLER Richard, astronome américain, 16.
 MURCHISON Roderick (1792-1871), géologue écossais, 3.

 NAPIER Bill (1940), astronome britannique, 4, 7, 10, 14, 19.
 NÉMÉSIUS d'Émèse (IV^e-V^e siècle), philosophe grec, 1.
 NEWTON Isaac (1642-1727), mathématicien anglais, 2, 3.
 NININGER Harvey (1887-1986), météoricien américain, 12.
 NOÉ (vers -2350), patriarche biblique, 2, 17, 19.

 OKA Takeshi, chimiste américain, 14.
 OLBERS Wilhelm (1758-1840), astronome allemand, 16.
 OLYMPIODORE (fin du VI^e siècle), érudit chrétien, 18.
 O'NEILL Gerard (1927-1992), physicien américain, 20.
 OORT Jan Hendrik (1900-1992), astronome néerlandais, 7.
 OPARINE Alexandre (1894-1980), biochimiste soviétique, 14, 16.
 OPIK Ernst Julius (1893-1985), astronome estonien, 18.
 ORBIGNY Alcide d' (1802-1857), naturaliste français, 3, 13.
 ORGEL Leslie (1927-2007), biochimiste britannique, 14, 15, 17.
 ORIGÈNE (v. 185-v. 254), théologien grec, 1.
 OVIDE (43 av. J.-C.-18 apr. J.-C.), poète latin, 1, 19.

 PALLAS Pierre-Simon (1741-1811), naturaliste russe, 3.
 PAPAMARINOPOULOS Stavros (1945), géophysicien grec, 19.
 PEARY Robert (1856-1920), explorateur américain, 10.
 PENFIELD Glen, géologue américain, 12.
 PIAZZI Giuseppe (1746-1826), astronome italien, 3.
 PICHLER Adolf (1819-1900), chimiste autrichien, 19.
 PLATON (427-347), philosophe grec, 1, 18, 19, conclusion.
 PLINE l'Ancien (23-79), naturaliste latin, 1, 2, 7, 19.
 POISSON Denis (1781-1840), mathématicien français, 3.
 POLLAS Christian (1947), astronome français, 6.

PRANTZOS Nicolas, astrophysicien français, 20.
 PTOLÉMÉE Claude (v. 90-v. 168), astronome grec, 3.
 PUISEUX Pierre (1855-1928), astronome français, 5.

 RABINOWITZ David (1960), astronome américain, 6.
 RADLOF Johann-Gottlieb (1775-1846), historien allemand, 3.
 RAMPINO Michael, biologiste américain, 16.
 RAMSÈS II (XIII^e siècle av. J.-C.), pharaon égyptien, 19.
 RAMSÈS III (XII^e siècle av. J.-C.), pharaon égyptien, 19.
 RASMUSSEN Kaare, astronome danois, 17.
 RAUP David (1933), paléontologue américain, 12, 15, 16.
 REAGAN Ronald (1911-2004), président américain, 20.
 REEVES Hubert (1932), astrophysicien canadien, 5, 14.
 REINMUTH Karl (1892-1979), astronome allemand, 4, 6.
 RICCIOLI Giovanni (1598-1671), astronome italien, 5.
 RIPERT Gaston (1881-1957), militaire français, 17.
 RÖSCH Jean (1915-1999), astronome français, 8.
 ROSS John (1777-1856), navigateur britannique, 10.
 RUBTSOV Vladimir (1948), historien scientifique russe, 9.
 RUSSELL Dale (1947), paléobiologiste canadien, 15.
 RYAN Michael, physicien américain, 9.

 SAFRONOV Victor (1917-1999), astronome russe, 13.
 SAGAN Carl (1934-1996), astrophysicien américain, 20.
 SAINT JEAN (I^{er} siècle), apôtre, auteur de l'Apocalypse, 2, 18.
 SANDULEAK Nicholas (1933-1990), astronome américain, 5.
 SCHEUCHZER Johann-Jakob (1672-1733), naturaliste suisse, 3.
 SCHIAPARELLI Giovanni (1835-1910), astronome italien, 7.
 SCHMADEL Lutz (1942), astronome allemand, 6.
 SCHRÖTER Johann (1745-1816), astronome allemand, 5.
 SCOTTI James (1960), astronome américain, 6, 17.
 SEKANINA Zdenek (1936), astronome américain, 7, 9.
 SÉNÈQUE (4 av. J.-C.-65 apr. J.-C.), philosophe romain, intro, 1, 3, 4.
 SEPKOSKI Jr. Jack John (1948-1999), paléontologue américain, 16.
 SERRES Marcel de (1783-1862), paléontologue français, 3.
 SÉTHI II (XII^e siècle avant J.-C.), pharaon égyptien, 19.
 SHAPLEY Harlow (1885-1972), astrophysicien américain, 17.
 SHELTON Ian (1958), astronome canadien, 5.
 SHOEMAKER Carolyn (1929), astronome américaine, 5, 16.
 SHOEMAKER Eugene (1928-1997), astronome américain, 5, 6, 11, 12.
 SMIT Jan (1948), géologue néerlandais, 12.
 SPANUTH Jürgen (1907-1998), archéologue allemand, 19.
 SPEDICATO Emilio (1945), mathématicien italien, 19.
 STEEL Duncan (1955), astronome britannique, 4, 10.
 STOTHERS Richard, géologue américain, 16.
 STUTZER Otto (1881-1936), chimiste autrichien, 19.
 SUESS Eduard (1831-1914), géologue autrichien, 11.
 SUESS Franz (1867-1941), chimiste autrichien, 19.
 SVETSOV Vladimir, astronome russe, 9.

SWIFT Lewis (1820-1913), astronome américain, 7.
 TELLER Edward (1908-2003), physicien américain, 20.
 TEMPLE Robert (1945), astronome américain, 17.
 TOLLMANN Alexander (1928-2007), géologue autrichien, 19.
 TSIOLKOVSKI Konstantin (1857-1935), ingénieur russe, 20.
 TUTTLE Horace (1837-1923), astronome américain, 7.

 UREY Harold Clayton (1893-1981), chimiste américain, 12.
 USSHER James (1581-1656), archevêque irlandais, 3.

 VAN ALLEN James Alfred (1914-2006), physicien américain, 8.
 VELIKOVSKY Immanuel (1895-1979), écrivain américain, 17, 19.
 VERNADSKY Vladimir (1863-1945), géologue russe, 16.
 VICTOR Paul-Émile (1907-1995), explorateur français, 20.

 WARD William, astronome américain, 13.
 WARMKESSEL Barry, physicien américain, 19.
 WATSON James (1928), généticien américain, 14.
 WEGENER Alfred (1880-1930), géophysicien allemand, 13.
 WEIHAUPT John (1930), géologue américain, 11.
 WEISSMAN Paul, astronome américain, 7.
 WHEWELL William (1794-1866), géologue anglais, intro.
 WHIPPLE Francis (1876-1943), astronome britannique, 9.
 WHIPPLE Fred (1906-2004), astrophysicien américain, 7, 9, 10.
 WHISTON William (1667-1752), astronome anglais, 2, 3, 7, 13, 19,
 conclusion.
 WICKRAMASINGHE Chandra (1939), astrophysicien britannique, 10, 14, 16.
 WICKRAMASINGHE Janaki, astrophysicienne britannique, 14.
 WILLIAMS Gareth, astronome américain, 7.
 WITT Gustav (1866-1946), astronome allemand, 4, 6.
 WOLBACH Wendy, chimiste américaine, 12.
 WOLF Max (1863-1932), astronome allemand, 6.

 YAO (III^e mill. av. J.-C.), empereur chinois, 1, 19.

 ZANDA Brigitte (1958), minéralogiste française, 17.
 ZANOT Mario, écrivain italien, 19.
 ZÉNON de Cittium (336-264), philosophe grec, 1.
 ZHAO Meixun (1959), biochimiste américain, 12.
 ZIGEL Felix (1920-1988), astronome russe, 9, 17.

ANNEXES

Annexe 1 : Les trois leçons du catastrophisme

1 LE CATACLYSME
EST LA RÈGLE
PARTOUT, TOUJOURS

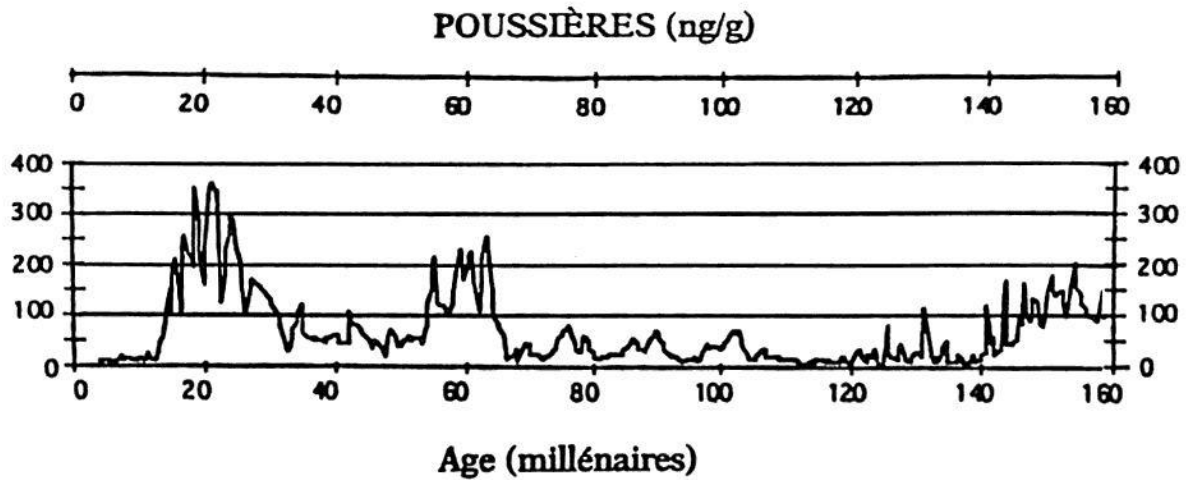
2 LA VIE ET LA MORT
VIENNENT DU COSMOS

3 L'HOMME EST LE FRUIT
DU CATACLYSME

L'homme est le fruit du cataclysme, un fruit périssable évidemment. Cela signifie qu'il n'est que de passage sur Terre comme toutes les autres espèces qui l'ont précédé. Comme je l'ai expliqué, il est le *Primate à la mode*, une simple étape de l'évolution, et devra céder sa place à d'autres espèces mieux adaptées. Même parmi les Primates, il est certain que certaines espèces lui survivront.

Seule nouveauté importante par rapport aux espèces précédentes : l'homme est capable de se détruire lui-même. Sera-t-il assez sage pour le comprendre et tenir compte de la menace qu'il a lui même créée ?

Annexe 2 : La poussière d'origine cosmique piégée dans les glaces

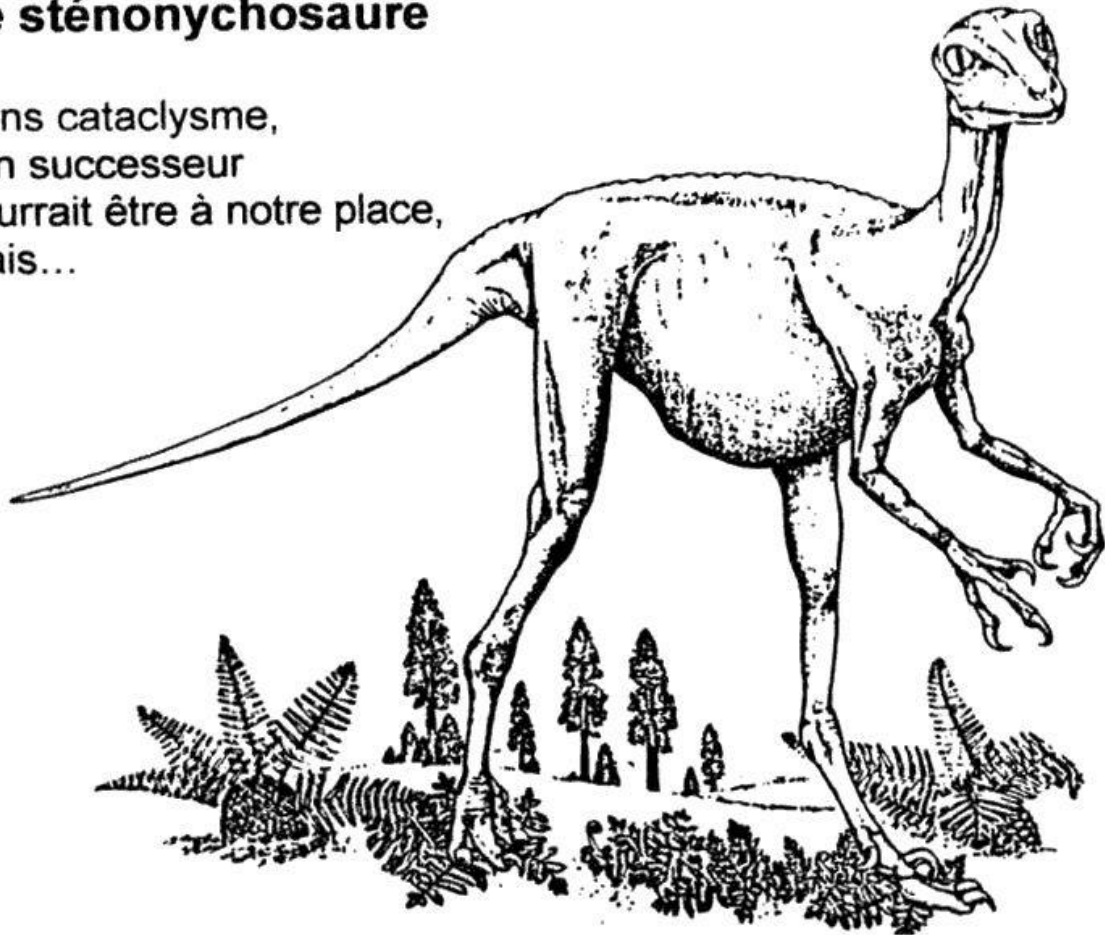


Cette figure concerne la quantité de poussière piégée dans la glace de l'Antarctique en nanogrammes (ng) par gramme (ou parts par milliard). Elle montre clairement que la quantité de 300 ng n'a jamais été atteinte durant 135 000 ans, même durant le cataclysme volcanique paroxysmique dû à l'éruption du Toba en Indonésie vers -75000, avant d'être franchie à plusieurs reprises à partir de -27000, pour ensuite retrouver sa valeur normale qui est très faible, inférieure à 25 ng, soit dix fois moins que lors des accès de fièvre. Ceux-ci ne peuvent s'expliquer que très partiellement comme conséquence logique d'une période glaciaire et des chercheurs catastrophistes, notamment les astronomes, croient maintenant que cette poussière excédentaire et anormale pourrait être partiellement, ou même totalement, d'origine cosmique et provenir de la désintégration de corps cométaires issus de l'ancien centaure Hephaios. (d'après un document de J.-C. Duplessy).

Annexe 3 : Sténony le malchanceux

Le sténonychosaure

Sans cataclysme,
son successeur
pourrait être à notre place,
mais...



Il a eu la malchance de vivre à la frontière Crétacé-Tertiaire

Le *sténonychosaure* (le *stenonychosaurus inequalis* pour les spécialistes) mesurait jusqu'à trois mètres du museau au bout de la queue, et est connu parmi ses congénères pour avoir eu le cerveau le plus gros et donc pour avoir été le plus à même de s'imposer comme la maître de la planète. Le cataclysme de la fin du Crétacé lui a coupé l'herbe sous le pied et a entraîné la disparition quasi totale de tous les dinosaures.

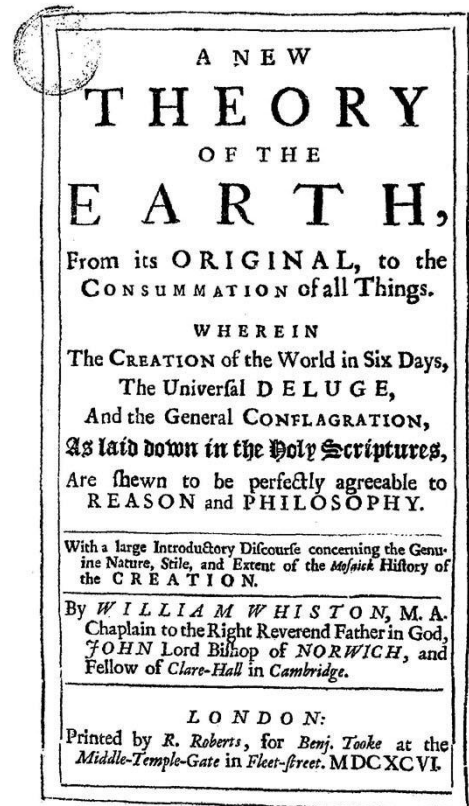
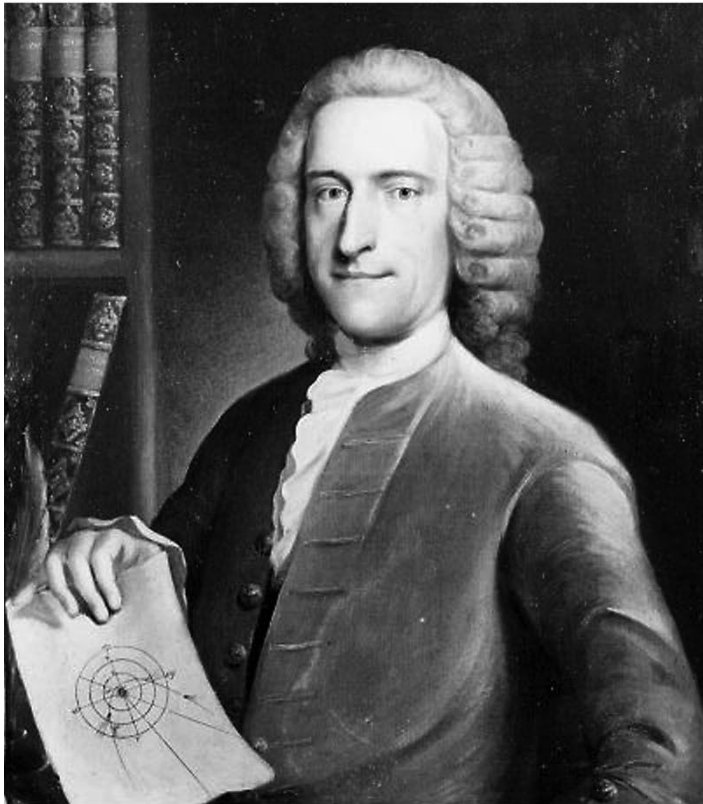
Il a été victime de la *malchance*. S'il avait été plus chanceux, son descendant pourrait être à notre place aujourd'hui. (La reconstitution de l'animal est due au Muséum National des Sciences Naturelles d'Ottawa, région dans laquelle on a retrouvé sa trace fossile).

Annexe 4 : La trajectoire de la comète Sekhmet



La comète Sekhmet des Égyptiens a pris différents noms, au fur et à mesure de son observation par les peuples qui ont eu à subir sa venue et les désastres qu'elle a engendrés. Elle est devenue Absinthe, l'Étoile de Baal et Anat au Proche Orient, puis Phaëton et Typhon chez les Grecs et enfin Surt accompagné par les Géants du feu pour les pays du nord de l'Europe. Sa fin a été cataclysmique avec l'épisode du Ragnarök.

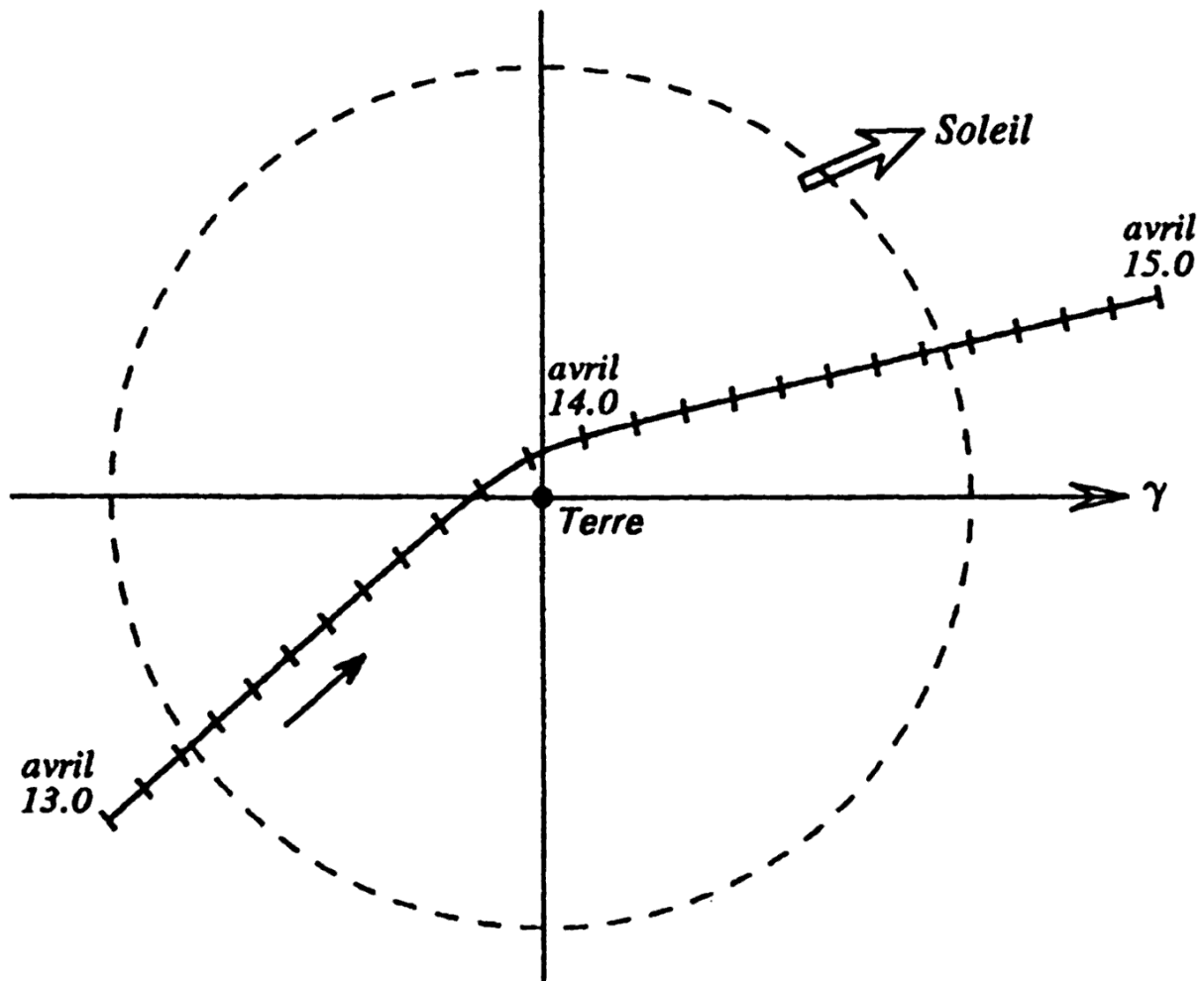
Annexe 5 : William Whiston, le premier astronome catastrophiste



William Whiston (1667-1752) est considéré comme le premier *astronome catastrophiste* de l'ère moderne, Thomas Burnet (1635-1715) étant, lui, le premier *géologue catastrophiste*. Écclésiastiques tous les deux, ils croyaient, à la suite de la visite à proximité de la Terre des formidables comètes de 1680 et 1682, que ces astres chevelus qui créaient la panique depuis l'Antiquité avaient été utilisés par Dieu pour la Création de la Terre et le Déluge biblique, et qu'ils pouvaient avoir encore une influence sur l'histoire de la Terre et sur l'histoire des hommes, notamment en provoquant l'Apocalypse. Ils voulaient *moderniser la Bible* pour la rendre plus crédible à une époque où le doute sur son exactitude commençait à s'installer dans l'esprit des scientifiques.

Les travaux et prédictions de Whiston ont été récupérés par la suite par les créationnistes de tout poil, ce qui l'a beaucoup desservi. Il n'empêche qu'il s'agit d'un pionnier important que Stephen Jay Gould a tenu à réhabiliter. Il l'a appelé : « Le parrain de la catastrophe » dans un essai paru dans *La foire aux dinosaures*. Ce n'est que justice !

Annexe 6 : Apophis, l'astéroïde qui fait peur



le vendredi 13 avril 2029

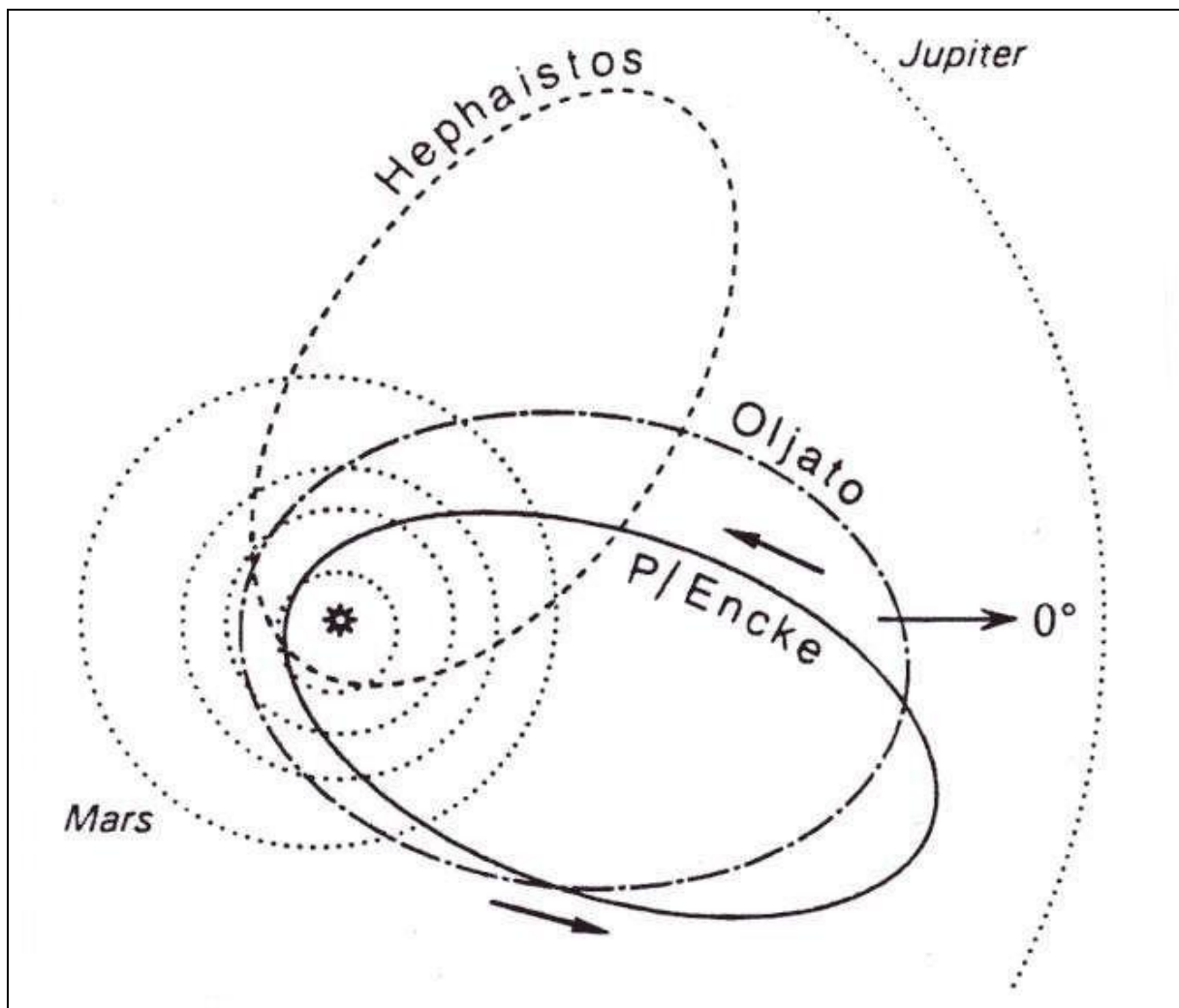
Cette date fait fantasmer beaucoup de monde depuis que l'on sait que cet astéroïde, découvert seulement en 2004, va s'approcher à 28 000 km de la surface terrestre, *si tout se passe normalement* (certains espèrent que non !) comme prévu par les scientifiques. Apophis inspire déjà l'intérêt ou la crainte, pour des raisons différentes.

Les astronomes observeront avec une très grande attention l'approche d'Apophis, le premier objet de type Aten qui va changer de catégorie et devenir de type Apollo, à la suite des perturbations très importantes que notre planète va lui faire subir. Apophis est un PHA (Potentially Hazardous Asteroid) et son diamètre est de l'ordre de 350 mètres, avec une fourchette actuelle entre 270 mètres et 400 mètres ($H = 19.7/19.2$).

Les charlatans, après l'échec cruel (pour eux) du 22 décembre 2012, vont annoncer que la collision est inévitable et que la fin de notre civilisation est imminente. Certains créationnistes fondamentalistes sont persuadés que l'Apocalypse est proche et qu'Apophis pourrait bien être *l'instrument* choisi par Dieu pour enfin punir l'humanité pécheresse ! Whiston (voir l'annexe 5) croyait déjà la même chose il y a plus de 300 ans.

Annexe 7 : La famille Hephaistos

La famille Hephaistos est l'une des clés du catastrophisme protohistorique, historique, et aussi du catastrophisme des siècles et des millénaires à venir. La désintégration de la comète mère, il y a quelques dizaines de milliers d'années, a engendré des dizaines de milliers de fragments et mini-fragments qui circulent aujourd'hui dans le Système solaire interne et qui peuvent frôler et heurter les quatre planètes intérieures.

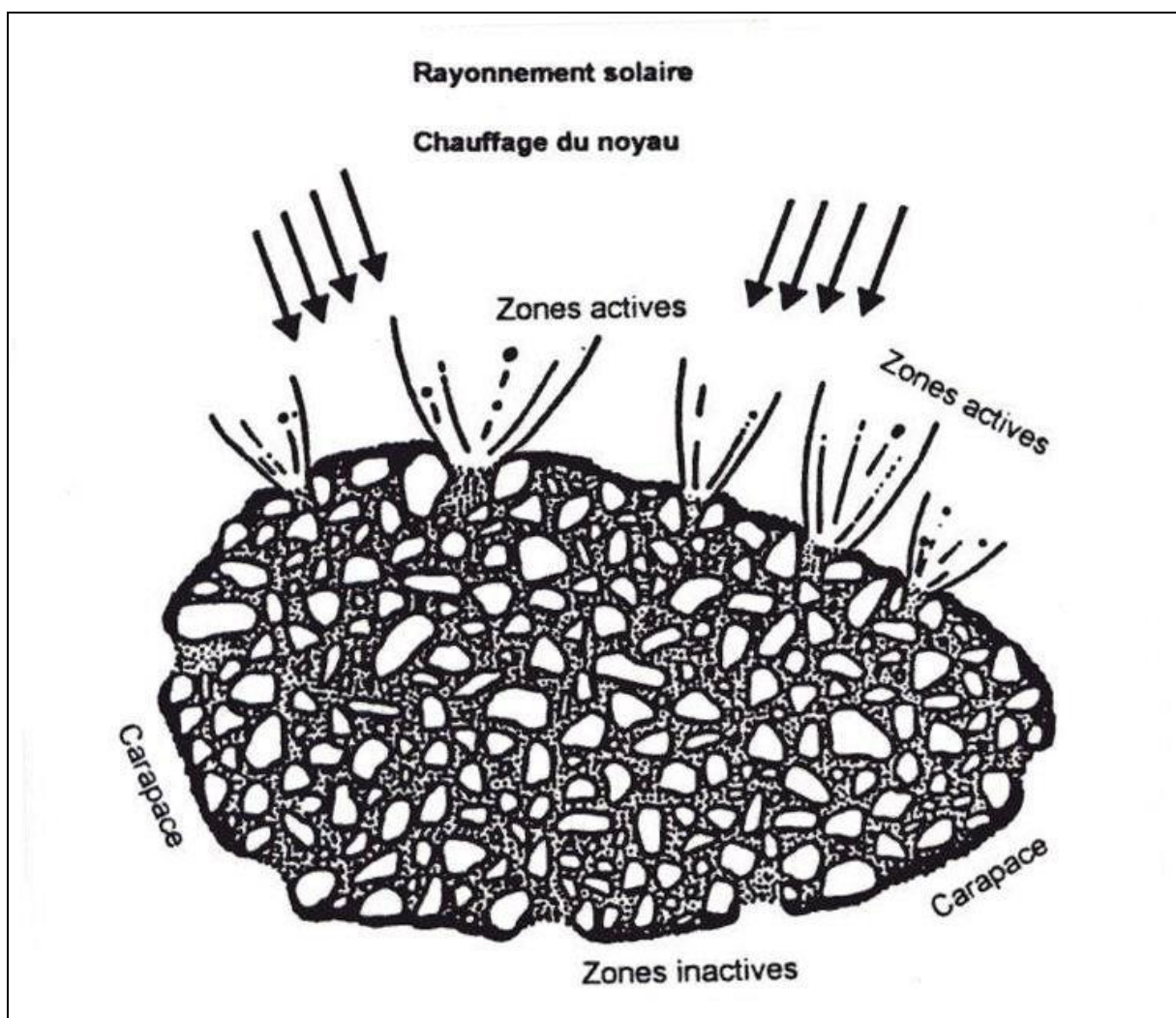


La figure montre trois des principaux fragments de la comète Hephaistos : l'astéroïde Hephaistos, le fragment principal, Oljato et P/Encke. On connaît actuellement 200 objets qui font partie de la famille Hephaistos, et on va en découvrir des centaines d'autres au cours des prochaines années. L'objet original pouvait approcher les 100 kilomètres de diamètre et les fragments principaux dépassent plusieurs kilomètres.

Certains fragments ont eu un aspect cométaire, d'autres non. Le modèle de l'objet mixte, mi-planétaire et mi-cométaire, proposé en 1986 par Gombosi et Houpis, montre clairement pourquoi.

Ce type d'objet est un agglomérat de particules d'origines diverses issues de la matière interplanétaire, ou même parfois interstellaire. Ces particules sont soudées entre elles par un "ciment". Une telle comète peut survivre pendant des millions d'années en dehors de perturbations trop importantes. Mais quand, à la suite de sérieuses perturbations successives qui font diminuer progressivement la taille de son orbite, elle frôle de trop près une planète, c'est la catastrophe et la désintégration.

Quand chaque fragment retrouve son autonomie, les parties glacées sont soumises à la sublimation et peuvent avoir un aspect cométaire pour une courte période, alors que les fragments rocheux restent planétaires.



C'est ce qui s'est passé pour la comète Hephaistos qui, en s'approchant trop près du Soleil, n'a pas résisté à un passage trop serré à Mercure ou Vénus, ou peut-être même à une double action conjuguée de ces deux planètes.

Table des matières

Avant-propos : Un livre d'astronome, 7

- Impactisme et catastrophisme, 7
- Définitions de l'impactisme et du catastrophisme, 8
- Quelques sigles et symboles, 9
- Systèmes de notes, 11
- Notes, 11
- Couverture et première page, 12

Introduction : Le renouveau des idées catastrophistes, 13

- Réhabilitation d'un concept scientifique, 13
- La science fait sa révolution permanente, 14
- De la science-fiction à la réalité de demain, 15
- Des preuves d'abord astronomiques et géologiques, 16
- Rechercher les causes de l'impactisme historique et protohistorique, 18
- Notes, 21

Partie 1 : L'évolution des idées catastrophistes

Chapitre 1 : Le catastrophisme dans l'Antiquité, 23

- Le souvenir obsessionnel de grands cataclysmes, 23
- Le catastrophisme mythologique : des dieux et des légendes, 24
- Le catastrophisme astrologique : alignements et cycles cosmiques, 30
- L'avertissement de Platon, 32
- Doctrines et écrits des philosophes et scientifiques de l'Antiquité, 33
- Notes, 35

Chapitre 2 : Déluge et catastrophisme biblique, 39

- La Bible, le livre incontournable, 39
- Le Déluge biblique, le premier grand fléau, 39
- Sodome et Gomorrhe, la vengeance de Dieu, 41
- Les dix plaies d'Égypte, 42
- La chute de pierres et le "miracle" de l'époque de Josué, 42
- L'Apocalypse de Saint Jean, 44
- Whiston et les comètes instruments de Dieu, 47
- La survivance moderne : le créationnisme, 51
- Le dogme renouvelé, ou la science de la Création, 53
- Notes, 54

Chapitre 3 : La grande époque des catastrophistes, 57

- Kepler, Newton et Halley domptent les astres, 57
- Théories de la Terre, Déluge et catastrophisme, 58
- La comète de Lexell, une révélation, 62
- Laplace, un grand astronome catastrophiste, 63
- Les météorites, des pierres tombées du ciel, 66
- 1803 : la chute de pierres de L'Aigle, le tournant décisif, 68

Cuvier, catastrophiste et fixiste, 70
Les disciples de Cuvier et les créations multiples, 72
Le recul des idées catastrophistes, 74
Notes, 76

Chapitre 4 : Impactisme et catastrophisme aujourd'hui, 81

Découvertes importantes durant la traversée du désert, 81
Les EGA, la preuve astronomique de l'impactisme, 83
Les astrolèmes, la preuve terrestre de l'impactisme, 84
Découverte de l'impactisme invisible, 85
Une révolution scientifique : l'iridium et les dinosaures, 85
Les météorites de l'armée américaine et l'ennemi extérieur, 86
SL9 : la preuve en direct de l'impactisme planétaire, 88
La première bible : Hazards due to comets and asteroids, 90
L'école britannique néo-catastrophiste, 91
Un danger qui se précise, 92
La menace du ciel : une réalité pour demain, 95
Le cataclysmisme, force de destruction et force de création, 95
Notes, 96

Partie 2 : Les causes

Chapitre 5 : Un Univers cataclysmique, partout, toujours, 99

Une naissance cataclysmique : le Big Bang, 99
L'évolution cataclysmique de l'Univers, 99
La naissance du Système solaire, 101
Une formation agitée : la guerre des mondes, 103
L'impactisme lunaire et ses conséquences, 105
Les explosions de supernovae et d'hypernovae, 108
Le Soleil, étoile variable et colérique, p. 110
L'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en juillet 1994, 111
Autres impacts cométaires possibles, 114
Le volcanisme dans le Système solaire, 115
Le cataclysmisme et le chaos, 118
Notes, 119

Chapitre 6 : Les astéroïdes qui frôlent la Terre, 121

Les astéroïdes dans le Système solaire, 121
Définitions et classification des différentes catégories d'objets, 122
L'historique des découvertes de NEA, 124
Les orbites des NEA, 126
La composition physique des NEA, 127
Une origine multiple pour les NEA, 128
Deux grands groupes : les NEA planétaires et les NEA cométaires, 132
Les diamètres et les masses des NEA, 133
Le nombre total probable de NEA, 134
Les approches possibles des NEA à la Terre, 135
Les très fortes approches réelles des EGA, 136

L'espérance de vie des NEA, 138
L'énergie d'impact des EGA, 142
L'énergie comparée des impacts et des cataclysmes terrestres, 142
Les NEA et l'hypothèse Hephaistos, 145
Notes, 147

Chapitre 7 : Les comètes, 151

Un danger connu depuis la nuit des temps, 151
Anatomie et composition des comètes, 152
Les fortes approches des comètes à la terre, 154
Le dénombrement des comètes, 158
Les orbites des comètes, 159
Les deux réservoirs de comètes, 160
Les centaures et les autres objets apparentés, 162
La désintégration des comètes, 165
La famille Hephaistos, 169
La comète la plus dangereuse : P/Swift-Tuttle, 173
L'énergie d'impact des comètes, 176
Notes, 177

Chapitre 8 : L'impactisme invisible, 181

Définitions, 181
Une découverte révolutionnaire : la radioastronomie, 183
Les différents types de rayonnement, 184
L'astronomie de la violence, 185
Les rayons cosmiques, 187
L'étoile Soleil, 188
Le Soleil et la Terre, 191
Les colères du Soleil, 193
La matière interplanétaire, 196
Poussières et gaz interstellaires, 198
Une autre source d'énergie invisible : l'antimatière, 200
Rencontres possibles avec un nuage interstellaire, 201
L'explosion de supernovae proches, 204
Notes, 206

Partie 3 : Les preuves

Chapitre 9 : L'événement de la Toungouska en 1908, 209

Les circonstances de la collision et les premières constatations, 209
Les premières expéditions : l'étude de la région dévastée, 211
Les points d'accord dans une controverse serrée, 213
L'hypothèse de la comète active, 216
L'hypothèse du noyau cométaire, 218
L'hypothèse de l'astéroïde, 219
Une source inépuisable d'hypothèses et d'élucubrations, 222
La région de la Toungouska, site protégé pour l'avenir, 224
Notes, 225

Chapitre 10 : Les météorites et les météores, 229

- Un phénomène connu depuis l'Antiquité, 229
- Météorites sacrées, 230
- 1492 : la météorite d'Ensisheim, un "miracle" bien réel, 231
- XVIII^e siècle : la destruction des collections, 232
- Les plus grosses météorites : des sidérites, 232
- 1947 : la "pluie de fer" de Sikhote-Alin, 233
- 1969 : Allende et Murchison, des trésors tombés du ciel, 235
- 1972 : le météore du Montana, le record d'approche à la Terre, 236
- 1976 : la chute de pierres de Jiling en Chine, 237
- Les météorites de l'Antarctique, 238
- Composition et classification des météorites, 239
- La météorite de Farmington et l'hypothèse Hephaistos, 240
- Les micrométéorites et la poussière cosmique, 241
- Les pluies de météorites, 242
- Quelques rappels sur les météores, 244
- L'histoire des essaims de météores les plus remarquables, 245
- Les essaims de météores liés à Hephaistos, 247
- Ce que nous apprennent les météorites et les météores, 248
- Notes, 251

Chapitre 11 : Les astrolèmes et les tectites, 255

- Une réalité longtemps contestée par les scientifiques, 255
- A partir de 1960, changement de tendance, 256
- L'histoire du Meteor Crater, 257
- L'espérance de vie des astrolèmes terrestres, 260
- Formation et identification des cratères météoritiques et des astrolèmes, 261
- Relations entre les impacts d'astéroïdes et les astrolèmes, 263
- Les petits cratères météoritiques terrestres certains, 264
- Les astrolèmes principaux probables, 265
- Les astrolèmes terrestres de moins de 40 millions d'années, 266
- Quelques astrolèmes géants hypothétiques, 268
- Les tectites, un mystère définitivement élucidé, 269
- Mécanisme de formation des impactites et des tectites, 270
- Les familles de tectites et les astrolèmes associés, 271
- Trois cratères parents pour les tectites d'Amérique du Nord, 272
- Le problème des tectites d'Australasie, 274
- Notes, 276

Chapitre 12 : La mort des dinosaures, 279

- L'extinction de la fin du Crétacé, 279
- Le problème de l'iridium et l'hypothèse des Alvarez, 280
- Une recherche multidisciplinaire sans précédent, 281
- Quelques autres hypothèses improbables, 283
- L'impact cosmique : la recherche des preuves, 287
- La recherche du cratère, 288
- Chicxulub : le cratère invisible mais bien réel, 290
- L'impact cosmique, 292

La période post-catastrophe, 293
L'extinction des dinosaures, 295
Une véritable révolution épistémologique, 296
Notes, 297

Partie 4 : Les conséquences

Chapitre 13 : Les conséquences terrestres, 301

La Terre primitive façonnée par les impacts, 301
L'origine de la Lune, 302
La Terre, la Lune et le chaos, 305
Les conséquences astronomiques de l'impactisme, 306
Les conséquences géographiques de l'impactisme, 307
Les conséquences atmosphériques de l'impactisme, 308
Fracturations et perforations de la croûte terrestre
et leurs conséquences, 310
Périodes glaciaires et variations climatiques, 312
Les conséquences des impacts océaniques, 313
Inversions du champ magnétique liées aux impacts, 317
Glissements et basculements des couches terrestres externes, 319
Notes, 325

Chapitre 14 : L'origine cosmique de la vie, 329

La vie : du plus simple au plus complexe, 329
La vie : un phénomène général dans l'Univers, 330
L'origine terrestre de la vie, 334
L'origine cosmique de la vie terrestre, 337
L'hypothèse de Crick : la vie inséminée sur Terre, 345
Retour sur la panspermie cométaire, 347
Notes, 348

Chapitre 15 : Extinctions et évolution, 351

Un renouvellement permanent des espèces, 351
L'histoire de l'évolution : la nature fait des bonds, 352
Fréquence et intensité des extinctions, 353
Causes possibles des extinctions, 354
Les cinq grandes extinctions de masse, 355
Extinction = régénération = moteur de l'évolution, 356
Corrélations extinctions – astroblèmes, 358
La paléoanthropologie face à la théorie de l'impactisme terrestre, 360
Le catastrophisme : un enchaînement d'événements, 365
L'importance de la contingence, 366
L'homme et la sixième extinction de masse, 368
Notes, 368

Chapitre 16 : La vie et la mort viennent du cosmos, 371

Conséquences biologiques de l'impactisme, 371
La biosphère, siège de la vie terrestre, 372
L'hypothèse Gaïa ou la Terre est un "système", 373

Les colères du Soleil, 375
 Inversions géomagnétiques et évolution, 377
 La couche d'ozone et l'impactisme, 378
 Rayons cosmiques : rayons de mort et/ou de vie ?, 378
 Les comètes, source de vie et de mort ?, 380
 La panspermie microbienne, vrai ou faux ?, 381
 Hiver d'impact et hiver nucléaire, 384
 La récurrence des extinctions et les coupables possibles, 386
 L'histoire de Geminig, 392
 La retombée des satellites artificiels, 393
 L'activité solaire, la vie terrestre et l'histoire, 395
 Notes, 397

Partie 5 : L'histoire cosmique des hommes

Chapitre 17 : Les fausses pistes, 401

Des érudits et des charlatans réécrivent l'histoire du monde, 401
 La comète Vénus de Velikovsky, 401
 Les quatre lunes de Hörbiger, 402
 L'explosion de Sirius B et la cosmogonie des Dogons, 403
 Vela X, l'étoile de Sumer et la légende d'Oannès, 405
 1916-1988 : le mythe de la météorite géante de l'Adrar, 408
 Cycles cosmiques et groupements et alignements de planètes, 411
 Fortes approches annoncées = fin du monde, 412
 L'anneau à éclipses de la Terre, 417
 Élucubrations diverses : décembre 2012, mondes antédiluviens et extraterrestres, 418
 Une hypothèse révolutionnaire : le singe descend de l'homme, 419
 L'Apocalypse : le fantôme des sectes religieuses, 421
 Notes, 422

Chapitre 18 : Cataclysmes terrestres dans l'Antiquité, 425

Des cataclysmes nombreux et variés, 425
 Un événement majeur : la dernière déglaciation, 426
 Le Déluge revisité par les glaciologues et les hydrologues, 430
 Une multitude de déluges locaux partout dans le monde, 435
 Sodome et Gomorrhe : un cataclysme sismique, 436
 L'éruption du Santorin et ses conséquences, 437
 Catastrophisme et atlantides, 442
 Retour au monde cyclique des Anciens, 444
 Notes, 446

Chapitre 19 : 13 000 ans de cataclysmes cosmiques, 449

Un avertissement en guise de prologue, 449
 Le Young Dryas Event et l'extinction du Pléistocène, 453
 Un impact sérieux en Autriche vers -7800, 459
 "La nuit de l'écroulement des mondes" des anciens Égyptiens, 461
 Un impact dans le Pacifique vers -2350, 463

La collision qui a bouleversé l'ordre du monde à la fin du XIII^e siècle avant J.-C., 465
L'impact cosmique à l'époque de Josué, 474
L'impact de Chiemgau en Bavière, 475
Quelques collisions possibles et non datées, 476
Notes, 478

Chapitre 20 : L'inconnu, l'avenir, 483

La formation du cratère lunaire Giordano Bruno en 1178, 483
Un impact en Antarctique = déglaciation partielle, 485
L'impactisme particulière : le vrai danger pour l'homme, 486
Conclusion : l'impératif extraterrestre, 488
Rendre Mars et Vénus habitables, 490
Envisager des colonies extraterrestres artificielles, 493
Spaceguard : la sauvegarde de l'humanité, 494
Faire face aux impacts : les stratégies envisagées, 496
Laisser des documents aux civilisations futures, 498
Notes, 500

Conclusion : Une révolution scientifique et culturelle, 503

L'impactisme terrestre : un puzzle qui devient lisible, 503
L'impactisme et le catastrophisme enfin reconnus, 505
Une nouvelle vision du monde se dessine, 507
Informer, à défaut de convaincre, 511
Notes, 512

Bibliographie, 513

Sites internet, 517

Index des noms, 521

Annexes, 529

Annexe 1 : Les trois leçons du catastrophisme, 529
Annexe 2 : La poussière d'origine cosmique piégée dans les glaces, 530
Annexe 3 : Sténony le malchanceux, 531
Annexe 4 : La trajectoire de la comète Sekhmet, 532
Annexe 5 : William Whiston, le premier astronome catastrophiste, 533
Annexe 6 : Apophis, l'astéroïde qui fait peur, 534
Annexe 7 : La famille Hephaistos, 535

Pour avoir davantage d'informations sur le sujet de ce livre,
pour visionner de nombreuses illustrations,
le lecteur peut consulter le site de l'auteur

LA MENACE DU CIEL

<http://www.astrosurf.com/macombes/>



QUATRIÈME DE COUVERTURE

Après plus d'un siècle de rejet complet, les idées et les hypothèses catastrophistes ont refait progressivement surface depuis le début des années 1950, grâce au travail remarquable de scientifiques de diverses disciplines qui ont privilégié l'observation plutôt que le dogme. L'IMPACTISME et le CATASTROPHISME qui lui est associé se sont imposés au fil des années et des découvertes comme des éléments essentiels, incontournables, de l'histoire de la Terre, de la Vie et des Hommes.

Ce livre innovant, écrit par un astronome spécialiste des astéroïdes qui frôlent la Terre, essaie de faire la jonction entre la science, le mythe et l'histoire à la lumière de toutes les données utilisables en ce début de XXI^e siècle. Le catastrophisme est un puzzle complexe, multidisciplinaire, et il faut remettre chaque pièce à sa place. Trois conclusions se dégagent : 1. Le cataclysme est la règle, partout, toujours ; 2. La vie et la mort viennent du cosmos ; 3. L'homme est le fruit du cataclysme, un fruit fragile et périssable.

Pour écrire ce livre, synthèse de quarante années de recherche, l'auteur a étudié de nombreuses hypothèses anciennes et actuelles, tout en restant résolument tourné vers l'avenir.

Michel-Alain COMBES est docteur en astronomie de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Depuis le début des années 1970, il étudie les géocroiseurs, l'impactisme terrestre et le catastrophisme d'origine cosmique. En 1982, il a publié une première version de *LA TERRE BOMBARDÉE*. Deux autres versions mises à jour ont été publiées sur Internet en 1998 et 2007. Il est le webmaster d'un site spécialisé : *LA MENACE DU CIEL*. L'astéroïde 3446 Combes a été nommé en son honneur en 1992.