Notre biosphère et les impacts météoritiques

Autor(en): **Cramer, Noël**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **55 (1997)**

Heft 283

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-898691

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Notre biosphère et les impacts météoritiques[1].

NOËL CRAMER

Depuis environ deux siècles les naturalistes, et plus particulièrement leurs homologues modernes, les géologues et les paléontologues, sont confrontés à l'évidence de l'évolution des formes vitales sur la Terre. Les indices sont inscrits dans les couches rocheuses créées elles-mêmes en partie par les êtres vivants. Le livre que ces derniers ont écrit de concert avec leur milieu ambiant se parcourt à travers les roches stratifiées rencontrées partout sur notre planète. Ce n'est pas un récit qui se déroule d'un bout à l'autre sans interruption. C'est plutôt une succession de chapitres où, tel un roman noir, certains protagonistes disparaissent pour laisser la place à de nouveaux. Contrairement à un roman, toutefois, la causalité des disparitions n'est pas clairement liée au contexte de l'histoire. Autant les «bons» que les «mauvais» subissent le même sort. Comme si un juge impartial parce *qu'extérieur* au récit délivrait ses sentences de manière arbitraire.

Introduction.

Il est établi que certaines crises de la biosphère liées au passage d'une ère géologique à une autre ont été provoquées par des bouleversements du milieu ambiant. Outre les causes physiques affectant le milieu, on a invoqué des causes biologiques telles que des épidémies, ou aussi la dégénérescence de certaines espèces. Mais la maladie ou la dégénérescence sont *spécifiques*, et la décadence peut s'étendre sur une durée considérable. Or les caractères marquants de certaines extinctions massives telle l'événement du Crétacé-Tertiaire il y a 65 millions d'années est précisément leur *non-spécificité* et leur *rapidité*[2]. On tendrait à incriminer en premier lieu des phénomènes géologiques, le plus plausible étant une poussée brutale de volcanisme qui modifierait l'albédo de l'atmosphère terrestre[3]. Peu d'autres causes terrestres connues ont la potentialité de bouleverser si rapidement et violemment la biosphère.

Ce n'est que depuis quelques dizaines d'années que l'on considère sérieusement des phénomènes extraterrestres: explosion d'une Supernova dans notre voisinage, variabilité subite et passagère du Soleil, passage à travers un nuage interstellaire dense, passage à proximité d'une autre étoile, impacts d'astéroïdes ou de comètes. Parmi ces diverses causes, c'est sans doute la dernière qui statistiquement est la plus probable et qui invoque le moins d'hypothèses. Les protagonistes sont encore dans ce cas internes au système solaire – mais c'est le premier pas pris au-delà de la cause purement terrestre. À au moins une occasion, celle de l'extinction massive du Crétacé-Tertiaire, c'est aussi celle qui est la mieux soutenue par les indices. C'est cette cause que nous allons discuter, et nous verrons qu'elle peut impliquer un pas supplémentaire qui nous mènera dans l'espace intersidéral.

La formation du système solaire

Notre système solaire s'est formé il y a 4.6 milliards d'années à la suite de l'effondrement d'un nuage moléculaire interstellaire composé d'hydrogène, d'hélium ainsi que d'une faible proportion (~2%) d'éléments plus lourds contenus sous forme gazeuse et dans la poussière associée au nuage mère.

Les processus qui mènent à la formation stellaire ne sont pas encore bien compris dans leurs détails, mais il apparaît que l'effondrement d'un nuage moléculaire froid tend à engendrer plusieurs étoiles plutôt qu'un seul objet. L'amas d'étoiles ainsi formé peut comprendre une dizaine à plusieurs milliers de membres. Les interactions gravitationnelles entre les étoiles de l'amas constitué permettent parfois à l'une d'entre elles d'atteindre une vitesse suffisante pour s'échapper; l'amas «s'évapore» peu à peu. Il est possible que notre Soleil se soit ainsi éloigné il y a bien longtemps de son lieu de formation. Mais il n'est pas totalement exclu qu'il se soit aussi formé isolément, à partir d'un fragment peu massif situé en marge du nuage et qui s'en serait détaché. La perturbation qui éjecte l'étoile d'un amas pourrait, en certains cas, disloquer un système planétaire déjà formé. L'existence, et la nature bien structurée de notre système solaire sont des indices qui plaident en faveur d'un milieu initialement peu perturbé.

La situation actuelle

Notre système solaire est actuellement constitué par notre étoile mère, le Soleil, accompagné des planètes dont la masse cumulée ne représente que quelque 2‰ de celle du Soleil. Plusieurs milliers d'astéroïdes occupent une large bande située entre les orbites de Mars et de Jupiter. D'innombrables (~10^{12}) comètes forment le présumé «nuage cométaire d'Öpik-Oort» qui enveloppe le système solaire. Avec une masse totale probablement supérieure à dix masses terrestres, ces corps cométaires sont situés bien au-delà des planètes les plus éloignées, à des distances comprises entre 10^4 et 10^5 Unités Astronomiques (une UA = distance moyenne Terre-Soleil). Un autre groupe de comètes, moins peuplé (~10^9 objets) et plus concentré vers le plan de l'écliptique, occupe la «ceinture de Kuiper» qui s'étendrait de 35 à 60 UA, juste au-delà des orbites de Neptune et de Pluton. Des observations récentes ont permis de détecter plusieurs objets dont les dimensions sont voisines d'une centaine de kilomètres dans cette zone.

Tous ces corps sont les résidus de la formation du Soleil. Les 9 planètes que nous connaissons ont été formées par l'accumulation locale, ou l'*accrétion*, des gaz et des débris disparates qui entouraient le jeune Soleil. Cette accrétion s'est déroulée par le biais d'impacts souvent très violents dans les régions centrales du système solaire[4]. L'énergie cinétique de ces impacts primitifs a suffisamment élevé la température des planètes rocheuses (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) pour les liquéfier et permettre ainsi la différentiation radiale de leur composition chimique par sédimentation. Les éléments les plus lourds se sont concentrés dans les régions centrales, tels notamment les «sidérophiles» (éléments qui s'allient facilement au Fer métallique). Outre le Fer, ce groupe comprend Co, Ni, Ge, Mo, Ru, Rh, Pd, Sb, W, Re, Os, Ir, Pt et Au[5]. Les composés plus légers, flottant sur le noyau métallique à la manière d'une écume, constituent le manteau et la croûte terrestres. La chaleur fossile, mémoire

[1] Ce sujet a été partiellement traité dans ORION 256, juin 1993.

[2] L'extinction massive du Crétacé-Tertiaire est la plus récente et, de ce fait, la mieux documentée. Toutes les extinctions antérieures n'ont pas été aussi subites. Certaines semblent s'être étendues sur 1-3 millions d'années.

[3] Notamment par l'injection de SO_2 dans la stratosphère.

[4] On pense que notre Lune a été formée lors de l'impact d'un objet au moins aussi grand que la planète Mars avec la Terre très tôt dans son histoire.

[5] On verra plus loin que l'Iridium (Ir) joue un rôle important dans la détection de roches d'origine extraterrestre.

de cette violente phase de bombardement, réside encore dans les profondeurs de notre planète et est partiellement entretenue par la décomposition de ce qui subsiste des éléments radioactifs de longue période présents à la formation du Soleil.

Le bombardement des corps planétaires a donc été très intense durant les premières centaines de millions d'années de leur vie, et ceux dont la surface a été peu modifiée par l'érosion atmosphérique ou par les mouvements de plaques continentales depuis 3 ou 4 milliards d'années (par exemple la Lune, ou Mercure, fig. 1) illustrent bien ce fait. Les innombrables débris qui circulaient dans le système solaire ont peu à peu fini par être éliminés, et il n'en subsiste qu'une faible proportion (fig. 2) susceptible d'entrer en collision avec une planète [7]. En ce qui concerne actuellement la Terre, cette incidence est faible mais non négligeable:

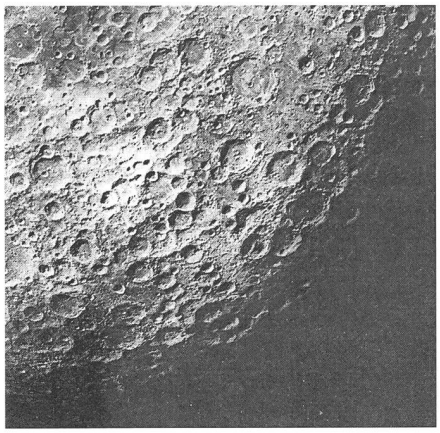


Figure 1:
La surface fortement impactée de la planète Mercure (NASA).

- Chaque jour, entre 100 et 1000 tonnes de météorites pénètrent dans notre atmosphère.
- 10^{12}, ou plus, de micrométéorites (m < 1g) se vaporisent dans l'atmosphère chaque année.
- Environ 10^5 météorites de 1g à quelques tonnes atteignent chaque année la surface terrestre.
- 1 à 5 météorites de plus de 100 tonnes susceptibles de former des cratères tombent chaque année.

Certains de ces événements sont très spectaculaires, et une raison pour laquelle nous n'en avons pas mieux conscience est due au fait que la Terre compte encore de vastes régions inhabitées (océans, déserts, régions polaires, etc.). Il nous est aussi moins facile de remarquer le passage d'un bolide brillant de jour, à fortiori en présence d'une couverture nuageuse.

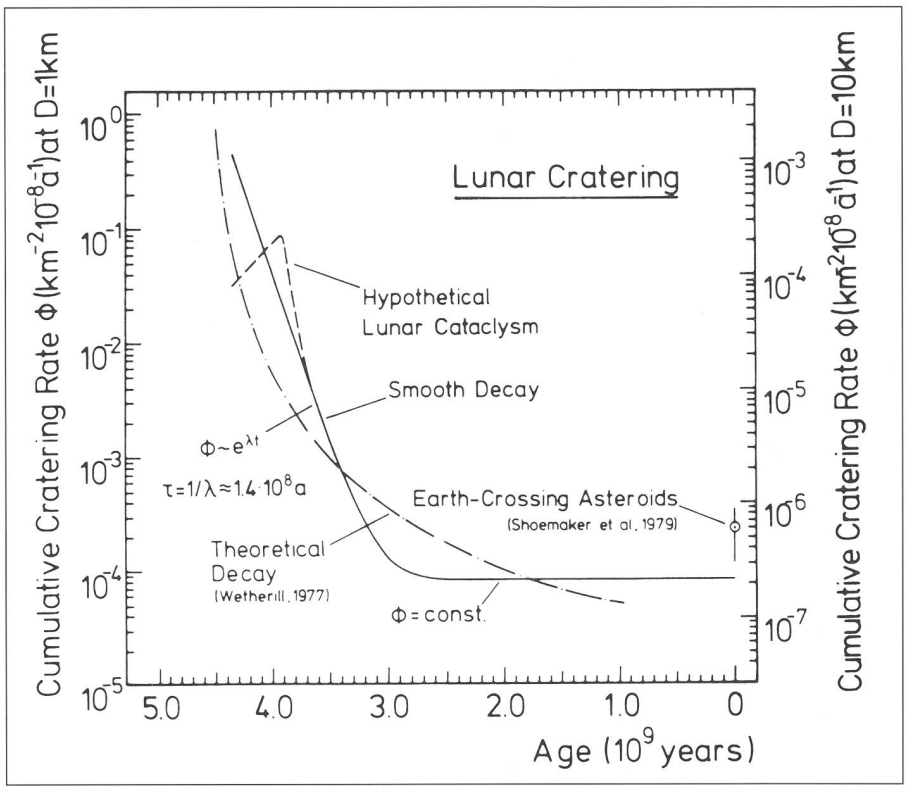


Figure 2:
Taux de formation de cratères lunaires au cours du temps ($km^{-2}10^{-8}a^{-1}$). Les deux échelles verticales correspondent à des cratères ayant des diamètres de 1, respectivement 10 km. Ce taux, très important au début, aurait peu varié depuis 3 10^9 ans (d'après G. NEUKUM [7]).

Beaucoup d'énergie pour peu

L'énergie cinétique d'une météorite, compte tenu des vitesses qu'ont habituellement les corps qui parcourent le système solaire est considérable, et varie selon le carré de sa vitesse relative. Dans le cas d'un impact avec la Terre, plusieurs facteurs déterminent cette vitesse. Notre Terre se déplace le long de son orbite avec une vitesse moyenne d'environ 30 km/s. A une UA, la vitesse d'évasion du potentiel solaire vaut 42 km/s[6]. C'est avec une vitesse comparable qu'une comète venant du nuage d'Öpik-Oort croise notre orbite. De plus, un corps qui choit sur la Terre subit une accélération supplémentaire de la part de notre champ gravitationnel. Sa vitesse est augmentée de la vitesse d'évasion terrestre, qui vaut un peu plus de 11 km/s. Il est également possible que la météorite nous parvienne du milieu interstellaire[7]. Dans un tel cas, sa vitesse pourrait encore être augmentée du mouvement du Soleil à travers ce milieu. Dans la majorité des cas toutefois, les plus grandes météorites que nous observons sont des débris issus de la ceinture d'astéroïdes et ont des orbites qui ne sont pas fort différentes de la nôtre[8]. Elles pénètrent dans l'atmosphère avec une vitesse caractéristique proche de 20 km/s. Les petits objets (de quelques dizaines à centaines de kg) sont suffisamment freinés par l'atmosphère et finissent leur chute en équilibre aérodynamique, à des vitesses voisines de 100 à 300 m/s. Les corps plus grands, qui ont un plus faible rapport surface/masse, peuvent atteindre le sol avec des vitesses de l'ordre de 10 km/s et forment alors des cratères d'impact. Dans le cas le plus favorable[9], c.-à-d. une collision frontale avec un objet venant des régions périphériques du système solaire, une comète par exemple, la vitesse de l'impact cumulerait celles mentionnées plus haut, et pourrait atteindre des valeurs proches de 80 km/s. C'est souvent le cas des «étoiles filantes» qui sont de petits fragments semblables à des grains de sable dispersés par d'anciennes comètes. L'essaim des Perséides, par exemple, est associé à la comète Swift-Tuttle et nous bombarde avec une vitesse proche de 60 km/s. A la vitesse extrême de 80 km/s, chaque kg de matière recèle une

6 Elle est de 618 km/s à la surface du Soleil
7 Les radioastronomes pensent avoir détecté un faible pourcentage de tels objets parmi les «étoiles filantes radio».
8 Elles sont plus excentriques, mais parcourues dans le même sens que le mouvement de la Terre.
9 La qualification de «favorable» dépend toutefois du contexte....

énergie cinétique équivalente à quelque 800 kg de TNT![10]. Des corps relativement petits, tel une météorite métallique de 3.5 m de rayon, seraient alors aussi dévastateurs qu'une charge nucléaire stratégique d'une mégatonne. Même si ce cas demeure exceptionnel, un nombre appréciable d'événements hautement énergétiques ont lieu chaque année (fig. 3a,b) [2]. Le cas le plus célèbre du 20e siècle fut l'événement du 30 juin 1908 qui eut lieu à Tunguska, en Sibérie. Un bolide explosa à environ 5 km d'altitude, libéra une énergie équivalente à 12 mégatonnes de TNT et rasa la forêt sur plus de 30 km à la ronde. Le fait que ce bolide ait explosé en l'air sans laisser de cratère a fait initialement penser qu'il s'agissait d'un petit noyau cométaire. Des études récentes ainsi que l'examen de poussières prélevées sur place[11] militent plutôt en faveur d'une grande météorite pierreuse, ou *chondrite*, de quelque 30 m de diamètre [15]. Un tel corps de cohésion faible serait disloqué en d'innombrables petits fragments par le choc de la pénétration dans la basse atmosphère. Son morcellement augmente fortement le freinage aérodynamique. La conversion brutale de l'énergie cinétique en chaleur le vaporise de manière explosive avant qu'il n'atteigne le sol.

Une Terre battue

De nombreuses traces d'impacts météoritiques existent sur Terre malgré l'importance des processus d'érosion qui prévalent à sa surface. On dénombre aujourd'hui plus de 150 grands cratères ayant des diamètres de quelques centaines de mètres à plus de cent kilomètres avec des âges atteignant quelques centaines de millions d'années. En examinant leur distribution géographique, on voit qu'ils se situent dans les régions les mieux étudiées et seulement sur les continents [16]. Ce nombre ne représente donc qu'une partie de l'ensemble réel (fig. 4). De nombreux cratères non encore érodés sont dissimulés par la nature du relief environnant (régions montagneuses, forêts, accumulation de sédiments lacustres, déserts de sable, fonds marins, etc.). Dans le cas d'impacts dans la mer, toute trace peut être effacée après quelques millions d'années par la subduction des plaques océaniques. Certaines régions comme le territoire canadien, par exemple, occupent une plaque continentale peu modifiée. Sa haute latitude boréale lui a valu d'être dénudée par des glaciations successives. Ce nettoyage superficiel a mis en

[10] Un kg de TNT libère 4.2 10^6 joules.
[11] Notamment dans les résines des arbres.

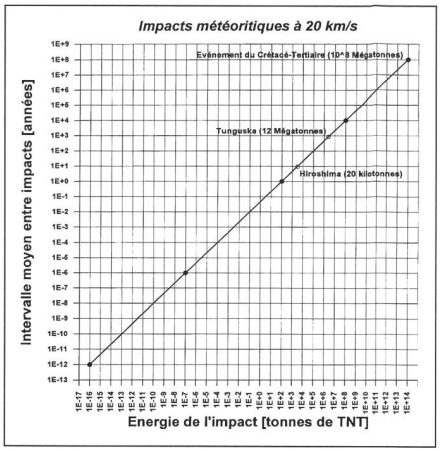


Figure 3a:
Fréquence d'impacts terrestres en fonction de l'énergie équivalente en tonnes de TNT (d'après L. & W. ALVAREZ [2]).

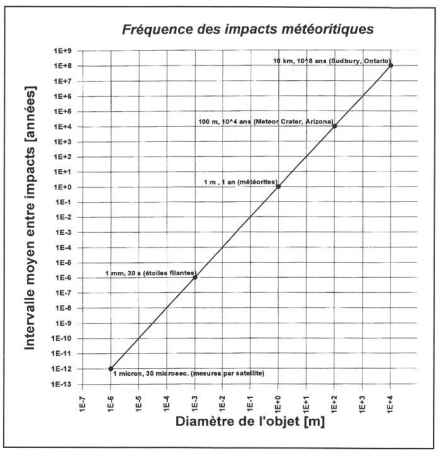


Figure 3b:
Fréquence d'impacts terrestres en fonction de la dimension de l'objet. (d'après L. & W. ALVAREZ [2]).

évidence dans ces territoires tectoniquement stables les traces inscrites dans la structure de la roche sous-jacente. Une campagne de reconnaissance aérienne organisée durant les années 1950 y a révélé de nombreux cratères d'impact, notamment: Holleford (2km), Brent (3km), New Quebec (3km), West Hawk Lake (4km), Deep Bay (12km), Lac Couture (14km), Clearwater Lakes (32km et 22km)[12], Carswell (32km), Manicouagan (65km), Sudbury (140km). À ces cratères bien identifiés s'ajoutent encore les formations remarquablement circulaires du Golfe de Saint Laurent (350km) et la côte orientale de la Baie d'Hudson (300km) [9]. D'importants impacts ont donc eu lieu sur Terre durant les quelques dernières cent millions d'années. L'effet sur la biosphère a dû, dans chaque cas, être ressenti sur de larges étendues sinon globalement.

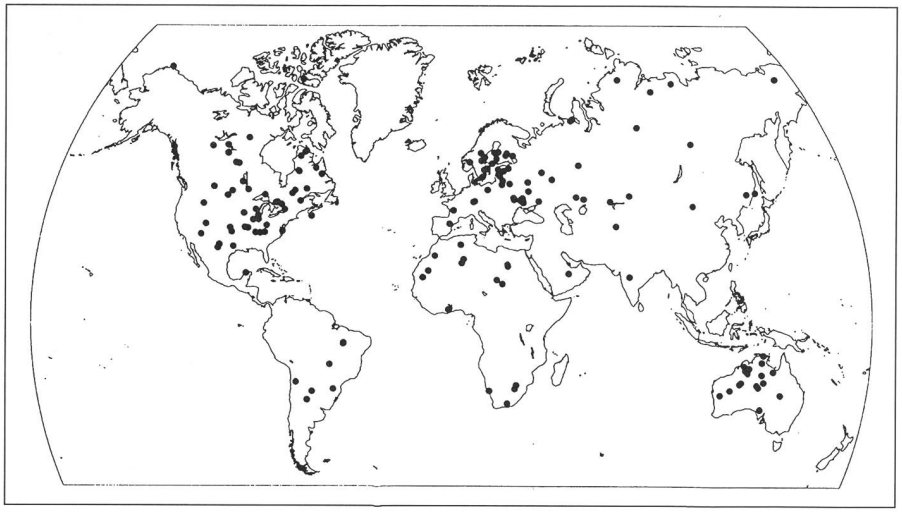
[12] Ce cratère double nous fait penser aux astéroïdes binaires découverts ces dernières années.

L'évolution des attitudes

La notion d'événements catastrophiques ayant affecté la biosphère est ancienne[13], mais le premier traitement scientifique du problème revient certes au Baron GEORGES CUVIER (1769-1832) qui fut frappé par les nombreuses discontinuités visibles dans la stratigraphie fossile. Il n'envisagea pas expressément les bombardements météoritiques, mais introduisit la notion de *catastrophisme* comme facteur prépondérant dans l'évolution des espèces. Cette manière de concevoir l'évolution du Monde fut fortement contestée par le géologue anglais Sir CHARLES LYELL (1797-1873), ins-

[13] Le mythe du déluge, par exemple.

Figure 4:
Distribution géographique des cratères d'impact connus. Leur distribution peu uniforme et uniquement continentale indique que l'échantillonnage est très incomplet (d'après R. GRIEVE, Geological Survey of Canada [16]).



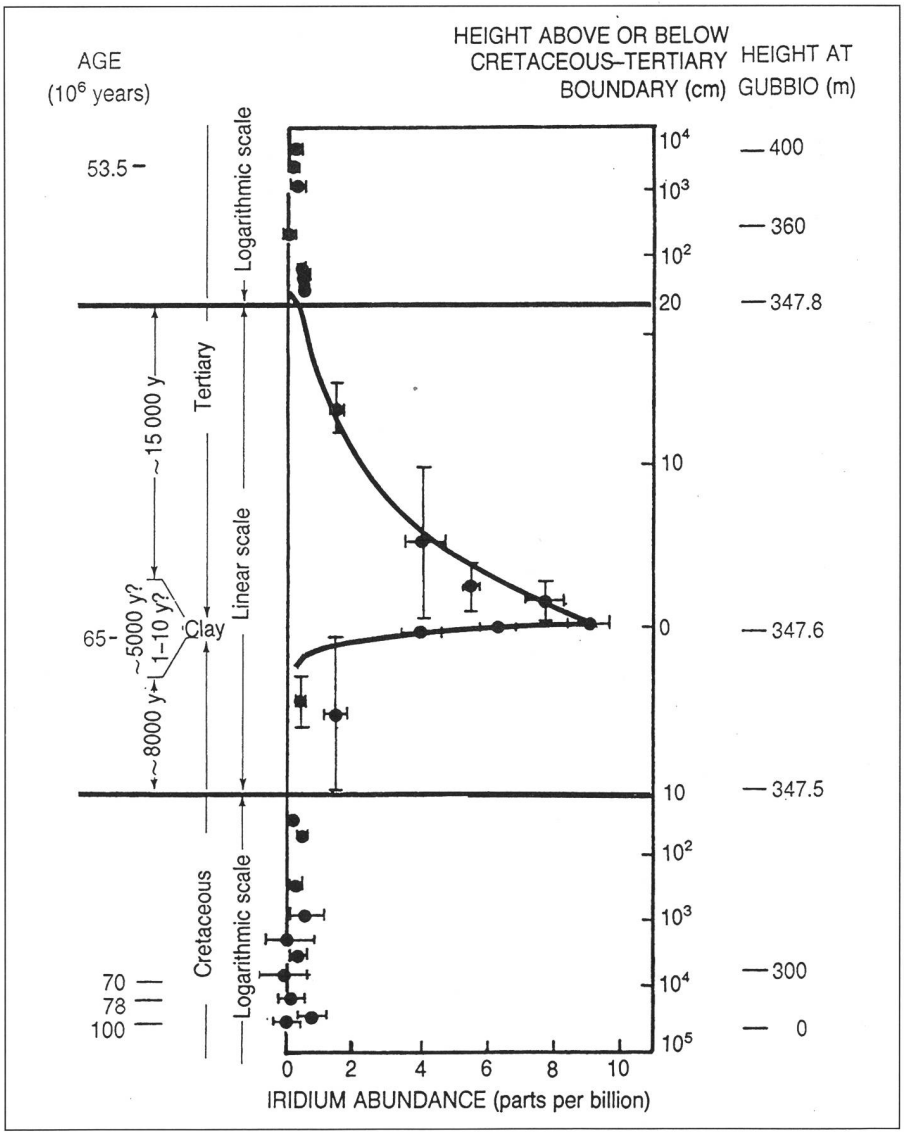
pirateur de CHARLES DARWIN, et qui préférait invoquer l'action prolongée de processus graduels et lents. Ce sont en effet de tels mécanismes qui forment les chaînes montagneuses, les roches sédimentaires, la morphologie du terrain et déplacent les continents les uns par rapport aux autres. Ce furent les partisans de LYELL qui emportèrent le débat à l'époque, et le *gradualisme* imprègne encore de nos jours la pensée des géologues. Ce rejet bien fondé mais non nuancé de la notion de catastrophisme a contribué à inhiber l'acceptation de facteurs extraterrestres. Encore dans les années 1960, certains spécialistes ne pouvaient admettre l'existence de plus d'une dizaine de cratères d'impact sur la surface terrestre. La majorité de ces derniers était considérée d'origine volcanique. Même la formation des cratères lunaires était, selon certains géologues, attribuable au volcanisme et il fallut attendre les missions spatiales des années 60-70 pour résoudre définitivement la question. L'idée de chutes de grandes météorites engendrant des catastrophes à l'échelle planétaire avait pourtant été exprimée à de nombreuses reprises. En particulier par l'astronome irlandais E.J. ÖPIK (1951, 1958), le planétologue M.W. DE LAUBENFELS (1956), le paléontologue canadien DIGBEY MCLAREN (1970) ainsi que le chimiste HAROLD UREY (1973). Mais, faute de preuves suffisamment bien établies, ces études marquèrent peu la communauté scientifique de l'époque. Le changement d'attitude en faveur de la théorie des impacts, et le débat très vif dont nous émergeons en ce moment, est à attribuer au géologue WALTER ALVAREZ et à son père, le physicien Luis W. ALVAREZ.

L'extinction du Crétacé-Tertiaire

Vers la fin des années 70, WALTER ALVAREZ étudiait le paléomagnétisme des couches calcaires du Crétacé et du Tertiaire exposées dans la gorge de Botaccione, à Gubbio dans les Apennins. Les inversions du champ magnétique terrestre, mises en évidence auparavant par la dérive des laves issues des dorsales océaniques, étaient perceptibles dans les roches de Gubbio. Son but était alors d'utiliser les inversions de la magnétisation résiduelle de ces roches pour mieux dater la dérive des fonds océaniques. Au cours de ses travaux, il fut intrigué par la couche d'argile épaisse d'environ un centimètre qui sépare la période du Crétacé, fin de l'ère Mésozoïque (ère des reptiles), de la période du Tertiaire, début de l'ère Cénozoïque (ère des mammifères). Il semblait évident que cette couche était associée à une catastrophe planétaire qui modifia profondément la faune marine de l'époque. Il était important de déterminer sa cause et de trouver un moyen d'estimer la durée du cataclysme [4].

L'idée de la solution vint de son père qui suggéra d'utiliser les méthodes d'analyse très sensibles développées au laboratoire de chimie nucléaire de Berkeley. Son intention était à l'origine de rechercher les traces d'une explosion Supernova qui se serait déroulée dans notre voisinage. Un tel événement aurait notamment enrichi le dépôt en Plutonium 244, un marqueur très spécifique d'une telle explosion. Pour estimer la durée de déposition, il envisagea de mesurer la concentration des éléments sidérophiles (voir plus haut), notamment de l'Iridium, présents dans ce dépôt. Ces éléments sont rares à la surface terrestre. Ils sont, par contre, beaucoup plus présents dans les météorites où leur abondance relative aux autres éléments a été peu modifiée. Admettant un apport constant de sidérophiles par les météorites, la mesure de leur concentration dans la couche d'argile relativement à celle trouvée dans les couches sous- et surjacentes devait permettre d'estimer le temps de formation du dépôt. A la surprise générale, on ne trouva pas de ^{244}Pu mais beaucoup d'Iridium. Sa concentration dépassait de 300 fois la valeur normale à la base de chaque échantillon du dépôt. Mais, curieusement, le taux décroissait graduellement en s'élevant dans la couche et retrouvait sa valeur initiale quelques cm plus haut (fig. 5). Cet apport massif d'Iridium en un temps très court lors de la formation de la couche a finalement conduit l'équipe menée par les ALVAREZ, FRANK ASARO et HELEN MICHEL à envisager, en 1980, l'impact d'une grande météorite comme étant l'agent du bouleversement survenu 65 millions d'années avant notre

Figure 5:
Distribution verticale de la concentration en Iridium dans les sédiments de la transition Crétacé-Tertiaire à Gubbio (d'après L. & W. ALVAREZ [2]).



ère [1], [2], [3]. Leurs mesures ont permis d'estimer la quantité totale d'Iridium contenue dans la couche d'argile répartie sur toute la surface terrestre[14] à environ 500000 tonnes. Moyennant l'abondance typique de cet élément dans les météorites (0.5 ppm), ces chercheurs ont postulé la chute d'un astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre. A une vitesse de 20 km/sec, un tel impact dégagerait une énergie équivalente à 10^8 mégatonnes de TNT – bien au-delà de toutes nos capacités technologiques. L'impact aurait causé l'éjection d'une énorme quantité de poussière et d'aérosols dans la haute atmosphère, obscurcissant le sol durant des mois, stoppant la photosynthèse et provoquant la mort d'une partie importante de la population animale par famine et une forte chute (entre -20°C et -40°C) de la température ambiante globale. D'innombrables feux de forêt provoqués à grande distance par les éjectas en fusion auraient contribué à l'obscurcissement de l'atmosphère par leur fumée. La chaleur dégagée par le passage du bolide à travers l'atmosphère et l'impact auraient en outre produit de grandes quantités d'oxydes d'azote qui, selon une estimation, rendirent les pluies suffisamment acides pour dissoudre les coquilles calcaires de mollusques marins.

Un tel événement n'est pas du tout invraisemblable. Plus de 350 astéroïdes qui croisent l'orbite terrestre sont actuellement connus[15], et on en découvre environ 25 nouveaux chaque année. La probabilité de subir un impact comparable à celui proposé par les Alvarez serait d'un par 10^8 ans (fig. 3a).

LUIS ALVAREZ cita une quinzaine de prédictions basées sur cette hypothèse [2]. Elles ont toutes été confirmées par la suite, et de nouveaux indices sont entre temps venus renforcer le scénario de la chute d'un astéroïde de 10 à 15 km de diamètre. La difficulté principale de l'hypothèse des Alvarez était à l'époque l'absence d'un cratère d'impact. Les impacts météoritiques produisent des formations dont le diamètre atteint 15 à 20 fois celui du projectile, et il «manquait» un cratère d'environ 200 km ayant le bon âge. En fait, il avait été trouvé mais passa inaperçu durant plusieurs années.

Un géant englouti

En 1981, les géologues G.T. PENFIELD et Z.A. CAMARGO présentèrent lors d'un congrès de géologie leur découverte d'une structure circulaire d'environ 180 km, située au nord de la péninsule du Yucatán et centrée sur la localité côtière de Chicxulub (*prononcé «Tschik-chou-loub»*). Cette formation n'est pas immédiatement apparente morphologiquement. Elle a été détectée par des mesures de magnétisme et par gravimétrie dans le cadre de la prospection pétrolière du golfe du Mexique. Cette communication scientifique, et l'interprétation de la structure comme étant le résultat d'un impact, passa inaperçue car les spécialistes auxquels elle s'adressait en premier lieu participaient alors à un autre congrès! Ce n'est que dix ans plus tard que d'autres équipes de géologues confirmèrent cette hypothèse. L'hypothèse de l'impact a depuis été renforcée par la découverte de traces de raz de marée sur les îles de Cuba et d'Haïti et de dépôts provenant de raz de marée à l'intérieur de la côte des USA bordant le golfe du Mexique[16], de quartz choqué et de particules de suie dans la couche d'argile à la limite C/T, par l'enrichissement en Iridium de roches ayant été fondues par l'impact au Yucatán. L'indice le plus fort est fourni par une datation très précise de l'époque de cristallisation de ces dernières par la méthode $^{40}Ar/^{39}Ar$. L'analyse situe l'événement à 65.2±0.4 millions d'années dans le passé [13].

Mais, si cette explication converge actuellement vers un consensus auprès de la communauté scientifique, les défenseurs d'une cause «terrestre» ne sont pas complètement désarmés [6], [14]. Une intense activité volcanique a formé les «traps» du Deccan, en Inde, à cette même époque reculée de 65 millions d'années. Le volcanisme qui a produit des couches de lave épaisses parfois de quelques kilomètres a certainement eu des effets qui ont été ressentis à l'échelle planétaire. Il n'est d'ailleurs pas impossible que les deux événements soient liés. Le Deccan est situé non loin de l'antipode actuel du Yucatán. Quelques géophysiciens ont proposé que le volcanisme[17] a pu être activé par la convergence de l'onde de choc de l'impact se propageant dans le manteau terrestre. Il faudrait encore tenir compte de la dérive continentale et examiner la situation relative de ces deux lieux à l'époque, mais une telle hypothèse tendrait à concilier les deux scénarios et renforcerait l'effet catastrophique de l'impact.

Une question subsiste encore: l'impact était-il unique, ou multiple? Des indices ont en effet récemment été relevés qui suggèrent l'impact contemporain d'un corps mesurant peut-être 2 km dans l'Océan Pacifique, ainsi que d'un autre objet plus grand encore dans l'Océan Indien. Il est toutefois prématuré de discuter de ces éléments encore mal établis.

Des comètes et des étoiles

Les astéroïdes ne sont pas les seuls agents de destruction cosmique qui nous menacent. Notre peur ancestrale des comètes repose en premier lieu sur leur apparition imprévue et sur leur aspect insolite. Cette peur est bien fondée, mais pour des raisons bien différentes. Leur vitesse élevée[18] et leur dimension[19] les rendent potentiellement plus meurtrières qu'un astéroïde de quelques kilomètres[20]. Dans le cas particulier de l'événement du Crétacé-Tertiaire, le consensus désigne cependant un astéroïde. Les comètes sont composées d'environ 80% de glace d'eau. Le reste de leur masse consiste en diverses glaces d'éléments volatiles et de seuls quelques pour-cent d'éléments lourds. Il est peu vraisemblable qu'une seule comète ait apporté la quantité d'Iridium mesurée. Mais, dans l'optique générale de la menace d'impacts, les comètes doivent être prises très au sérieux.

Comme mentionné plus haut, le système solaire est entouré de deux systèmes cométaires. Selon l'état actuel de nos connaissances, le plus proche, la ceinture de Kuiper, est essentiellement constitué par les *vrais* résidus du disque protoplanétaire et contient des corps qui n'ont pas, ou peu, participé à la formation des planètes. Le nuage d'Öpik-Oort, par contre, consisterait en corps cométaires qui se sont approchés des régions centrales du jeune système solaire et ont été «catapultés» vers l'extérieur par l'attraction des grosses planètes. Beaucoup ont dû disparaître dans l'espace intersidéral, mais il en resterait encore plus de mille milliards! Paradoxalement, ces comètes plus éloignées se distinguent généralement de celles provenant de la ceinture de Kuiper par la faible abondance des glaces les plus volatiles (tel le Néon, point de sublimation à 25°K): elles ont été exposées à des températures plus élevées lors de leur pénétration antérieure dans le système solaire.

Les lointaines comètes du nuage d'Öpik-Oort sont très lâchement liées par le champ gravitationnel solaire. De fai-

[14] Quelques 10^{12} tonnes d'argile.
[15] On estime à environ 1500 le nombre réel de tels astéroïdes plus grands que 1 km et à 135000 ceux >100 m!

[16] Traces de Tsunami datées à 65 10^6 ans.
[17] Probablement latent, sinon en cours à l'époque.

[18] De l'ordre de 60 km/sec.
[19] La comète Hale-Bopp possède un noyau d'environ 50 km de diamètre.
[20] On se souviendra des effets spectaculaires observés sur Jupiter à la suite de l'impact de la comète Shoemaker-Levy, en 1994.

bles perturbations peuvent soit les libérer et les envoyer parmi les étoiles, soit les engager sur une trajectoire qui peut les faire pénétrer dans le domaine des planètes intérieures. Le beau spectacle qu'elles nous offrent alors est sournoisement lié à un danger potentiel. Une perturbation extérieure telle une étoile qui s'approcherait du Soleil, ou même notre passage à travers un nuage interstellaire dense, brasserait le nuage cométaire et enverrait un grand nombre de comètes dans notre direction. On pourrait alors subir une série de bombardements sur une durée de quelques 10^4 à 10^6 ans. Cette hypothèse a été explorée par D.M. RAUP et J.J SEPKOSKI en 1984, qui ont pensé avoir détecté une périodicité dans les extinctions animales [11], [12]. La fréquence de 26 millions d'années qu'ils proposèrent était assez proche de la demi-période de l'oscillation du Soleil de part et d'autre du plan galactique[21]. Lors du croisement du plan galactique, la chance de traverser un nuage interstellaire perturbateur augmente. Une autre hypothèse fut présentée aussi à cette époque par le physicien R.L. MULLER [10]. Il proposa l'existence d'un compagnon stellaire peu lumineux du Soleil, qu'il nomma «Nemesis», dont l'orbite très excentrique l'amènerait périodiquement dans le nuage d'Öpik-Oort avec la même périodicité. Une telle orbite dont l'aphélie atteindrait environ 2 années-lumière serait toutefois instable car très vulnérable à une perturbation extérieure.

L'examen du registre paléontologique de ces dernières 240 10^6 années où les extinctions d'espèces marines sont assez bien documentées semble, néanmoins, assez convaincant (fig. 6a, b). Mais la comparaison avec la datation des cratères d'impact l'est moins (fig. 6c) [15]. Nemesis n'a toujours pas été observée, et la périodicité proposée par RAUP et SEPKOSKI est parfois contestée comme pouvant résulter d'un biais dans le dénombrement des variétés de fossiles. La question reste encore ouverte. Des données récentes ouvrent peut-être de nouvelles voies.

L'astrométrie

Le satellite astrométrique européen *Hipparcos* dont les résultats viennent d'être rendus publiques a amélioré la précision des parallaxes et mouvements propres de quelque 10^5 étoiles de notre voisinage d'un facteur 20. Ces mesures ont permis, en particulier, à une équipe d'astronomes conduite par R.A. PRESTON et J. GARCÍA SÁNCHEZ d'identifier plus de 1200 étoiles proches ayant un mouvement propre tangentiel voisin de zéro. La plus grande partie de leur mouvement doit donc être dirigée soit directement vers nous, soit dans le sens opposé. La composante radiale de leur vitesse est facilement mesurée depuis le sol par la spectroscopie. Leur étude a permis de découvrir ainsi six étoiles qui passeront dans les prochaines 10^6 années plus près que notre actuelle voisine *Alpha du Centaure* qui se trouve à 4.39 années-lumière. Si leurs résultats se confirment[22], la dernière d'entre elles s'approchera même à moins d'une année-lumière. L'étoile Gliese 710, une naine rouge de magnitude 9 actuellement à 63 années-lumière dans la constellation du Serpentaire s'approche à la vitesse de 18.6 km/sec. Dans un peu plus d'un million d'années elle sera à 5.3 10^4UA et aura pénétré profondément dans le nuage cométaire d'Öpik-Oort. Son éclat sera alors comparable à celui de l'étoile de première grandeur Betelgeuze.

De telles études faites sur la base des résultats du satellite Hipparcos, ou de ses homologues futurs, permettront d'inventorier les rencontres passées et à venir avec nos voisines stellaires. Quelques-uns des liens qui se dissimulent dans les lacunes qui séparent les chapitres de l'histoire géologique de la Terre seront sans doute clarifiés. Mais... le prochain chapitre débutera-t-il déjà dans un million d'années?

Conclusion.

Le bombardement cosmique n'est qu'une des multiples causes de modification de la biosphère. Il est «catastrophiste» par essence. L'explosion d'une Supernova dans notre voisinage[23] serait aussi de cette nature. La majorité des autres agents de transformation se déroulent cependant avec plus de lenteur, graduellement. C'est notamment le cas des phénomènes géologiques, climatiques ou dans un sens large, «écologiques». La notion de lenteur est toutefois très relative. À l'échelle géologique un million d'années est encore une durée brève. Des changements climatiques peuvent être plus rapides. Mais la vie s'adapte vite à des changements de son biotope. Pour provoquer une extinction globale il nous semble que le changement doive être initialement rapide et radical.

Le débat concernant les extinctions massives poursuit vivement son cours. Chaque année voit la publication de plusieurs nouvelles interprétations et d'innombrables études étayant l'une ou l'autre des théories à la mode. Le domaine est en effet soumis aux aléas de la «mode». Les impacts météoritiques le sont depuis les travaux des Alvarez. De nos jours on voit de plus en plus de scénarios «terrestres» où la théorie du chaos est appliquée aux systèmes écologi-

[21] Période d'environ 60 10^6 ans.

[22] Les mouvements propres tangentiels peuvent être faussés si l'étoile possède un compagnon non décelé. La mission Hipparcos a été trop courte pour détecter les variations d'ordre supérieur propres à un mouvement orbital dans la plupart des cas.

[23] A moins de 100 années-lumière.

Figure 6a: Une périodicité dans les extinctions? Pourcentage de disparitions d'espèces animales marines au cours des 240 dernières 10^6 ans. Les barres verticales correspondent à un cycle de 26 10^6 ans ajusté aux pics d'extinction. La corrélation est de 9 cas sur 10 (d'après SEPKOSKI [15]).

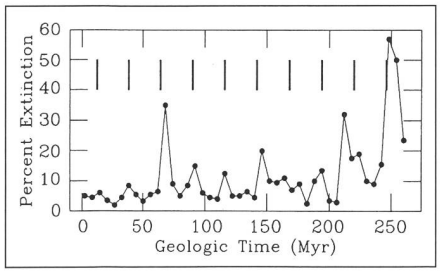


Figure 6b: La corrélation de la figure 6a est encore mieux mise en évidence lorsque l'on porte les 9 cycles les mieux définis en fonction du temps. La pente de la droite est de 26 10^6 ans. Seul le cycle 7 ne semble pas avoir de contrepartie dans le registre géologique (d'après D. STEEL [15]).

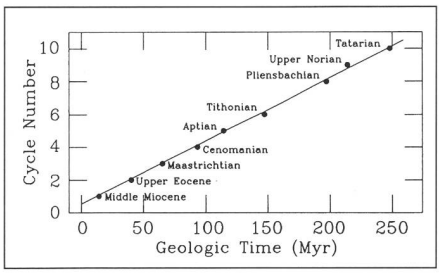
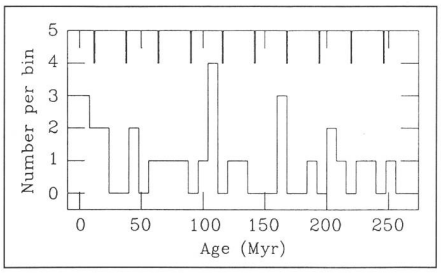


Figure 6c: Distribution des cratères >5km formés dans le même intervalle de temps de 240 10^6 ans échantillonné par tranches de 8 10^6 ans. Le cycle de 26 10^6 ans est le même que plus haut. Une périodicité qui serait en phase avec les extinctions n'est pas immédiatement apparente (d'après D. STEEL [15]).



ques, ou à la physique de l'atmosphère ou encore à la circulation des magmas sous la croûte terrestre, par exemple.

La réalité consiste sûrement en une combinaison de plusieurs causes, un concours de circonstances peut-être. L'impact de corps extraterrestres joue incontestablement un rôle important; tel a été le cas il y a 65 millions d'années. Néanmoins, la majorité des autres grands cratères d'impact terrestres ont pu être datés. Même si l'erreur sur la datation est souvent relativement grande, il n'est pas toujours aisé de les associer à une extinction (fig. 6c) ni d'identifier les traces d'un effet global dans le registre géologique. Il est vrai que l'inventaire de ces cratères doit être très incomplet (fig. 4), mais notre sentiment est «qu'il manque encore quelque chose» dans la causalité. Il est toutefois probable que les impacts d'astéroïdes et comètes servent d'amorce à un enchaînement d'autres facteurs de déséquilibre de la biosphère. Des générateurs de «chaos», en quelque sorte.

L'étude de l'évolution de la vie est encore une discipline jeune. La nouvelle approche est faite avec une vision plus large. Elle est pratiquée de manière croissante dans un contexte pluridisciplinaire. Les années qui viennent nous apporteront des réponses par l'exploitation de nouvelles idées et d'indices encore insoupçonnés. Chacune des extinctions massives du registre paléontologique sera peut-être alors perçue comme étant le résultat d'ensembles de circonstances composés de manière différente d'une fois à l'autre.

NOËL CRAMER
Observatoire de Genève
Ch. des Maillettes 51, CH-1290 Sauverny

Bibliographie

[1] ALVAREZ, L.W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL H.V., 1980, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction,* Science, v.208, p. 1095.
(Premier article où est exposée la théorie de l'impact causant l'extinction C/T).

[2] ALVAREZ, L.W., 1987, *Mass extinctions caused by large bolide impacts*, Physics Today / July 1987.
(Très bonne présentation de synthèse de la théorie d'impact C/T).

[3] ALVAREZ, W., ASARO, F., 1990, *An Extraterrestrial Impact*, Scientific American, October 1990. *(Version plus vulgarisée de [2]).*

[4] ALVAREZ, W., 1997, *T.rex and the crater of Doom,* Princeton University Press.
(Récit très personnel de l'élaboration de la théorie de l'impact du C/T par son principal auteur. Excellente illustration du processus de recherche. Bibliographie exhaustive).

[5] CHAPMAN, C.R., MORRISON, D., 1989, *Cosmic Catastrophes*, Plenum Press.
(Est encore une des meilleures introductions au sujet des agents cosmiques pouvant engendrer des catastrophes sur Terre. Profiterait cependant d'une remise à jour).

[6] COURTILLOT, V.E., 1990, *A Volcanic Eruption*, Scientific American, October 1990.
(Article vulgarisé présentant la thèse du volcanisme, notamment au Deccan en Inde).

[7] GEHRELS, T. (Editor), 1994, *Hazards due to Comets & Asteroids,* The University of Arizona Press.
(Ouvrage collectif s'adressant au spécialiste. C'est le texte le plus complet actuellement disponible concernant le sujet).

[8] LEWIS, J.S., 1997, *Rain of Iron and Ice,* Addison-Wesley.
(Traitement moderne par un planétologue du danger de bombardement par des astéroïdes et comètes. Bien documenté et de lecture agréable).

[9] MARK, K., 1987, *Meteorite Craters*, The University of Arizona Press.
(Introduction aux cratères d'impact terrestres par une géologue-journaliste scientifique. Très bien documenté et de lecture agréable).

[10] MULLER, R.A., 1988, *Nemesis: the Death Star*, Weidenfeld and Nicholson.
(Récit très personnel et même candide de la recherche du compagnon hypothétique du Soleil «Nemesis». Illustre bien le processus de recherche scientifique).

[11] RAUP, D.M., SEPKOSKI, J.J., 1984, *Periodicity of extinctions in the geologic past,* Proceedings of the National Academy of Sciences, v.81, p.801.
(Première proposition d'une périodicité dans les extinctions massives).

[12] RAUP, D.M., 1986, The Nemesis Affair, W.W. Norton & company.
(Récit personnel et informel d'un chercheur impliqué dans la recherche des causes de l'extinction C/T. Illustre aussi particulièrement bien le comportement de la communauté scientifique confrontée à de nouvelles idées).

[13] SHARPTON, V.L., DALRYMPLE, G.B., MARTIN, L.E., RYDER, G., SCHURAYTZ, B.C., URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1992, *New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary,* Nature, Vol. 359, October 1992.
(Datation précise de la formation de Chicxulub au Yucatán).

[14] STANLEY, S.M., 1987, Extinction, Scientific American Library.
(Bonne présentation par un paléontologue des thèses classiques expliquant les extinctions massives. Ouvert, mais avec réticence envers les causes extraterrestres).

[15] THOMAS, P.J., CHYBA, C.F., MCKAY, C.P., (Eds.), 1997, *Comets and the Origin and Evolution of Life,* Springer Verlag.
(Ouvrage collectif destiné aux spécialistes. Articles de revue donnant une vision moderne du rôle joué par les comètes dans le développement de la vie sur Terre. La thèse des impacts y est présentée de manière convaincante).

[16] VERSCHUUR, G.L., 1996, *Impact!,* Oxford University Press.
(Bon exposé par un astronome présentant avec compétence la menace d'impacts. Discussion des mesures préventives possibles (projet Spaceguard). Spécialement intéressant par sa vision historique).

Materialzentrale SAG

SAG-Rabatt-Katalog «SATURN», mit Marken-Teleskopen, Zubehör und dem gesamten Selbstbau-Programm gegen Fr. 3.80 in Briefmarken:

Astro-Programm SATURN
1997 neu im Angebot: Zubehör (auch Software) für alte und neuste SBIG-CCD-Kameras. Refraktoren, Montierungen und Optiken von Astro-Physics, Vixen, Celestron und Spectros; exklusives Angebot an Videos u. Dia-Serien für Sternwarten, Schulen und Private usw.

Selbstbau-Programm
Parabolspiegel (ø 6" bis 14"), Helioskop (exklusiv!), Okularschlitten, Fangspiegel- u. -zellen, Hauptspiegelzellen, Deklinations- u. Stundenkreise usw. Spiegelschleifgarnituren für ø von 10 bis 30cm (auch für Anfänger!)

Profitieren Sie vom SAG-Barzahlungs-Rabatt (7%).
(MWST, Zoll und Transportkosten aus dem Ausland inbegriffen!)

Schweizerische Astronomische Materialzentrale SAM
Postfach 715, CH-8212 Neuhausen a/Rhf, Tel 052/672 38 69

METEORITE

Urmaterie aus dem interplanetaren Raum
direkt vom spezialisierten Museum
Neufunde sowie klassische Fund- und Fall- Lokalitäten
Kleinstufen - Museumsstücke

Verlangen Sie unsere kostenlose Angebotsliste!

Swiss Meteorite Laboratory
Postfach 126 CH-8750 Glarus
Tél. 077/57 26 01 – Fax: ++41-(0)55/640 86 38
Email: buehler@meteorite.ch