Notre biosphère et le cosmos

Autor(en): **Cramer, N.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **51 (1993)**

Heft 256

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-898184

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 le Cosmos[1]

N. CRAMER

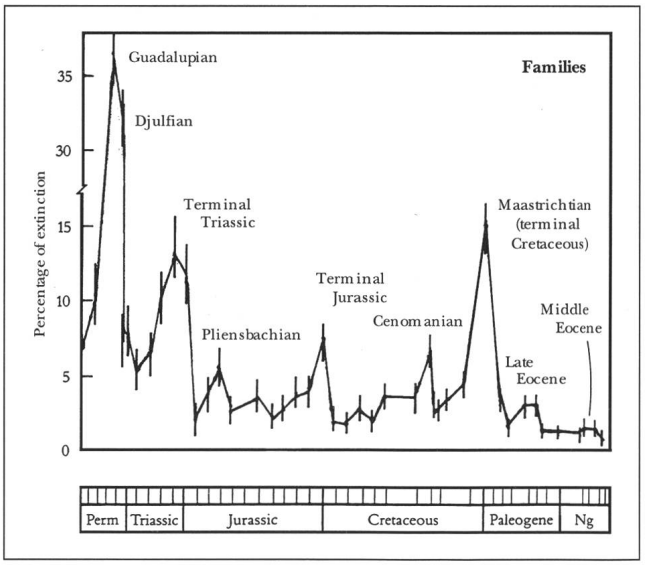
Introduction

Par les événements qui marquent les étapes de chaque jour, du parcours de notre vie, de celles qui jalonnent l'histoire des civilisations, de notre préhistoire telle que nous la déduisons d'indices épars, l'environnement vital dans lequel nous évoluons donne l'apparence d'être immuable, une enceinte close où de lentes transformations se poursuivent sans le concours de facteurs extérieurs. Et pourtant, nous le savons bien maintenant, notre Terre est une planète géologiquement active avec une surface qui évolue encore, un petit élément dans un système solaire moins statique que nous le pensions il y a quelques décennies seulement, avec un Soleil qui, comme toute étoile, évolue lentement et a même augmenté en luminosité de quelque 25% depuis l'apparition de la vie sur la Terre il y a plusieurs milliards d'années. L'ensemble de notre système solaire fait un tour de notre galaxie en un peu plus de 220 millions d'années et, au cours de son voyage à travers l'espace, il voit aussi se modifier son environnement stellaire et interstellaire. Avec cette vision des choses, il devient difficile de nier le rôle que doivent jouer des influences extérieures dans l'évolution de notre fragile biosphère. On pourrait même retourner la question et, au vu de l'archive paléontologique, s'étonner de la longue durée de vie de cette biosphère et de la relative stabilité des conditions qui y ont régné. Quelles sont les conditions qui autorisent notre existence et, en particulier, quelles sont les influences cosmiques auxquelles nous sommes soumis?

Si les plus anciens fossiles connus de créatures multicellulaires, ou métazoaires, se trouvent dans des roches vieilles de 600 millions d'années, et que certains indices suggèrent une origine remontant même à un milliard d'années, les paléontologues ont également mis en évidence des traces d'êtres plus rudimentaires tels que des bactéries et des algues bleues semblables aux cyanophycées ainsi que des colonies de ces dernières, des stromatolites, inscrites dans des roches vieilles de 3.5 milliards d'années. Il est intéressant de noter ici que des stromatolites se développent encore à présent dans quelques enclaves marines chaudes et peu profondes et dont la salinité élevée éloigne les prédateurs potentiels de ces formations vulnérables. Il est certain que la composition et la température de l'atmosphère étaient alors très différentes des valeurs actuelles; mais de tels organismes fossiles, trouvés dans des roches sédimentaires, démontrent l'existence à cette époque reculée de bassins océaniques où se déroulait déjà la photosynthèse de l'oxygène à partir du gaz carbonique. Comme indicateur, l'état liquide de l'eau est d'un caractère beaucoup plus contraignant vis-à-vis des conditions physiques prévalantes, notamment de la température, que la simple existence d'une atmosphère. Le débat concernant l'évolution de l'atmosphère terrestre des origines jusqu'à nos jours, et l'extrapolation de celle-ci dans le futur, est encore ouvert, activement soutenu et riche en rebondissements. Ainsi, le facteur qui a assuré la pérennité de ce que nous appelons la «biosphère» semble avoir été lié en premier lieu à la conservation de l'état fluide des océans, en relation étroite sans doute avec la nature de l'atmosphère qui ne représente, en fait, que 3 à 4 pour mille de la masse océanique (voir table en fin d'article). L'existence de la biosphère, comprise ici dans son sens le plus large, dépend essentiellement de l'eau; les variations de nature «périphériques» de la composition atmosphérique n'ayant affecté jusqu'à présent que la diversité des formes vitales.

Les océans ont, selon toute évidence, permis à la vie de se développer et de survivre sur notre planète durant ce très long laps de temps de 3.5 milliards d'années. Les paléontologues sont parvenus à décrire de manière détaillée l'évolution et la différentiation des espèces animales et végétales. A partir de l'apparition des métazoaires, l'évolution s'est accélérée dans le sens d'une complexité croissante. Mais le registre paléontologique montre, à certaines époques, l'apparition de «crises écologiques» où l'on assiste à l'extinction brutale de nombreuses espèces animales et, en moindre mesure, végétales (fig. 1). Ces incidents de parcours sont toujours suivis d'une reprise des espèces survivantes amoindries et, plus tard, de l'apparition d'espèces nouvelles. Comme si ces dernières profitaient alors d'une opportunité créée par une reconfiguration de l'environnement. Ces bouleversements de la biosphère ont pu avoir des causes multiples, différentes d'une fois à l'autre: dérèglement catastrophique des mécanismes complexes de l'écologie; apparition de nouveaux prédateurs; modifications climatiques provoquées par une forte activité volcanique globale; glaciations, etc. De nombreuses causes «internes» de ce type ont été évoquées par le passé, et ce n'est que récemment que l'on envisage des facteurs externes, cosmiques, pour expliquer

Fig. 1: Le taux d'extinction des familles animales durant ces dernières 250 millions d'années (d'après D.M. Raup).



[1] Texte de la conférence donnée à l'occasion de l'assemblée générale 1993 de la SAS à Granges (SO).

certaines des grandes extinctions. L'importance de ces facteurs a initialement été largement minimisée par les géologues et paléontologues, et continue à être contestée par certains.

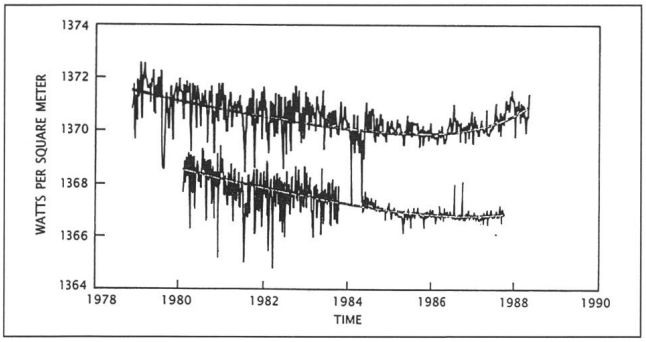
Notre planète est soumise en permanence aux influences extérieures. On peut classer ces facteurs en deux grandes catégories: ceux propres à notre système solaire, et ceux dépendant de notre voisinage stellaire.

Le système solaire: le rôle du Soleil.

La biosphère dépend directement de l'apport énergétique du rayonnement électromagnétique solaire. Mais ce rayonnement, source de vie au niveau du sol, a intrinsèquement des propriétés très adverses. Notre atmosphère sert de bouclier contre les rayonnements γ et X, et la faible quantité d'ozone formée photo-chimiquement dans la haute atmosphère nous protège de l'effet stérilisant du rayonnement ultraviolet de courte longueur d'onde ($\lambda < 3000$ Å). Le Soleil émet aussi un flux variable de particules chargées, constitué en majorité de protons et d'électrons, qui est modulé par son cycle d'activité de 11 ans. Ce vent solaire pourrait présenter de grands dangers pour les êtres vivants (ainsi qu'aux astronautes naviguant en orbite basse) s'il n'était intercepté et canalisé par le champ magnétique terrestre dans ce que nous appelons les ceintures de Van Allen. Des modifications durables du rayonnement solaire ainsi que du rôle protecteur de l'atmosphère et du champ magnétique terrestres auraient pu contribuer à déclencher des crises écologiques.

Or, notre Soleil, par sa très faible variabilité lumineuse, est plutôt atypique si nous le comparons à l'ensemble des étoiles. L'amplitude de la variation de la constante solaire, telle qu'elle a pu être mesurée sur un cycle de 11 ans par des instruments placés sur orbite (fig. 2), est inférieure à 2‰. Des observations photométriques d'étoiles de type solaire, par contre, montrent assez fréquemment des variations atteignant quelques % en l'espace de quelques mois à quelques années. A plus long terme, depuis que nous disposons de dénombrements des taches solaires (dont la présence est liée à une augmentation du débit énergétique du Soleil), on a pu constater d'importantes fluctuations de ce que nous appelons le nombre de Wolf (fig. 3). On remarque, notamment, une période importante, le minimum de Maunder où, entre 1645 et 1715 on n'observa pratiquement pas de taches solaires. Durant cette époque, on a assisté en Europe à l'avance de certains glaciers alpins et à des étés froids qui ont diminué le rendement des récoltes. D'autres indices, basés sur l'abondance relative du ^{14}C, isotope radioactif du carbone, suggèrent des fluctuations plus ou moins longues de la constante solaire durant les dernières quelques dizaines de milliers d'années. Le ^{14}C est fabriqué par le

Fig. 2: Variation de la «constante solaire» mesurée sur un cycle par les satellites astronomiques NIMBUS 7 et SMM.



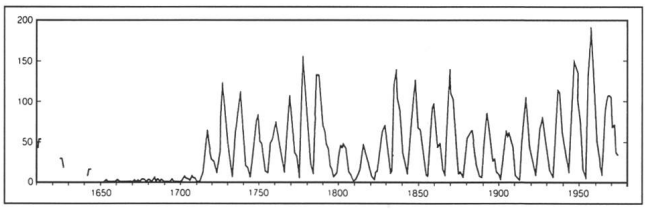


Fig. 3: Variation du Nombre de Wolf depuis le début du dénombrement systématique des taches solaires. Le «minimum de Maunder» est bien apparent à gauche.

bombardement de l'azote (^{14}N) par des neutrons issus de réactions secondaires du rayonnement cosmique galactique avec l'atmosphère. Le taux de ^{14}C relativement à l'isotope stable ^{12}C est modulé par l'activité solaire, car un vent solaire plus important transporte dans le milieu interplanétaire des champs magnétiques qui tendent à dévier le rayonnement cosmique corpusculaire chargé. *A une plus forte activité solaire correspond un taux $^{14}C/^{12}C$ plus faible.* L'analyse de la variation de ce taux au cours du temps tend à montrer un comportement multi-périodique de l'activité solaire, avec des valeurs de 2300, 208, 88 et 11 ans. Il n'est donc pas exclu qu'en des temps plus reculés, des variations de l'activité solaire aient contribué à modifier le climat en entraînant des perturbations des biotopes.

En ce qui concerne l'opacité de l'atmosphère au rayonnement ultraviolet, nous connaissons tous le débat actuel au sujet des fréons qui diffusent dans la haute atmosphère. Il n'est pas impossible que la couche d'ozone ait été temporairement réduite dans le passé, mais par des causes naturelles liées peut-être au volcanisme. Au sujet de l'effet protecteur du champ magnétique, il est bien connu, d'après les orientations magnétiques fossiles des magmas solidifiés de part et d'autre des dorsales océaniques, que la dynamo terrestre inverse occasionnellement sa polarité. Nous ne savons pas comment s'opère la transition; est-elle accompagnée par une disparition momentanée du champ magnétique, ou bien assistons nous à une migration plus ou moins rapide des pôles magnétiques d'un pôle géographique à l'autre? Quoi qu'il en soit, des perturbations de la couche d'ozone et des modifications de l'intensité du champ magnétique terrestre ont dû, par le passé, jouer un rôle dans l'histoire de la vie.

A plus long terme, l'évolution naturelle du Soleil finira par rendre la Terre inhabitable. On a déjà mentionné que, depuis l'apparition de la vie dans les océans, notre Soleil a augmenté de luminosité d'environ 25%. Ce scénario va se poursuivre inlassablement et, dans 6 à 7 milliards d'années environ, le Soleil aura épuisé l'hydrogène dans sa partie centrale et entamera une rapide évolution vers sa phase de géante rouge (fig. 4a, b, c). Bien avant cette échéance, la température à la surface terrestre aura atteint des valeurs trop élevées pour permettre aux océans d'exister sous forme liquide. La question est de savoir quand se produira la stérilisation de notre planète et l'évaporation des océans. La modélisation de ce processus est difficile en raison du grand nombre de facteurs qui entrent en jeu. Parmi les quelques tentatives de réponses à cette question on peut citer un travail de J.E. Lovelock et M. Whitfield (1982) où leur modèle prédit, à la suite de l'échauffement dû à l'augmentation de la luminosité solaire, une altération chimique accrue des roches siliceuses avec libération de calcium et formation de carbonates à partir du CO_2 atmosphérique. Ceci devrait entraîner une diminution du CO_2 au-dessous d'un seuil critique pour la photosynthèse

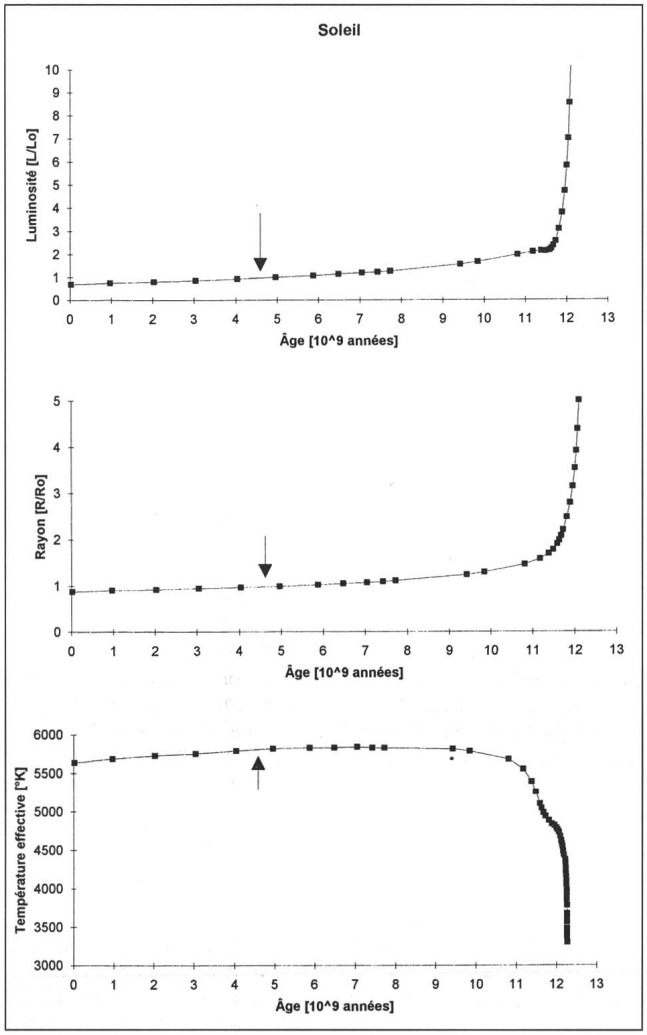


Fig. 4: Evolution de la luminosité, du rayon et de la température effective du Soleil au cours du temps. La flèche indique son stade actuel (d'après G. Schaller, D. Schaerer; G. Meynet, A. Maeder, Observatoire de Genève).

végétale, et leur modèle donne à notre biosphère un avenir d'environ 100 millions d'années. Cette valeur peut paraître faible au vu du long passé de la vie terrestre. Un modèle plus récent, élaboré par K. Caldeira et J.F. Kasting (1992), est plus optimiste et donne encore au moins 900 millions d'années de vie à notre biosphère, situant aussi l'évaporation des océans à plus d'un milliard d'années au delà de cette échéance. Ces modèles ne donnent que des ordres de grandeur, car les données sont multiples et leurs interactions très complexes. Mais l'intérêt croissant pour le problème posé par l'existence hypothétique d'une vie extraterrestre va encourager ce type d'investigation, et il faut s'attendre à disposer d'estimations plus réalistes dans un proche avenir.

Le système solaire: le rôle de l'orbite terrestre.

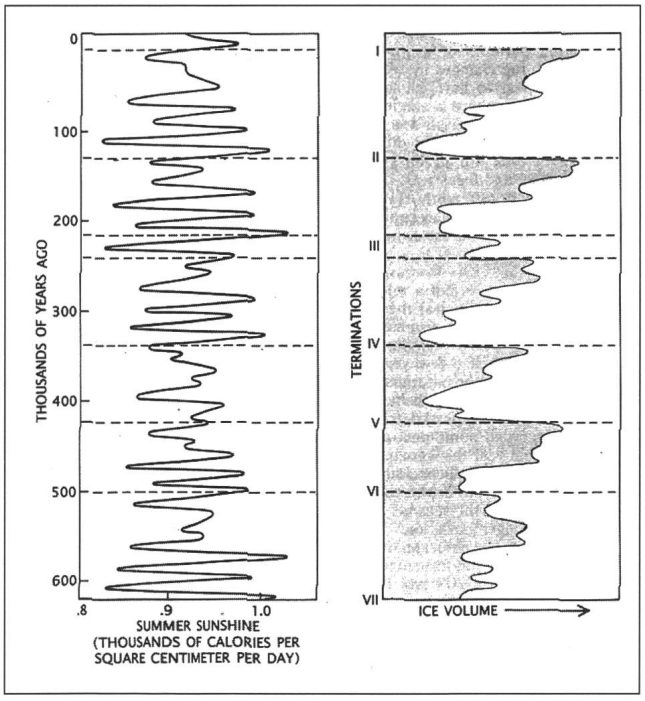
L'orbite que parcourt la Terre dans sa ronde autour du Soleil est légèrement elliptique et s'écarte du cercle avec une excentricité *e* qui vaut actuellement 0.0167. Au périhélie la Terre est à 147.1 millions de kilomètres du Soleil, à l'aphélie elle se trouve à 152.1 millions de km. De plus, l'axe de rotation diurne de la Terre est incliné par rapport à la normale au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) d'un angle, l'obliquité ε, qui vaut actuellement 23.5°. Lors du passage au périhélie, qui a lieu vers le 3 janvier de chaque année, la Terre est à son point le plus proche du Soleil; six mois plus tard, à l'aphélie, elle se trouve plus distante de 5 millions de km. Vers le 20 mars et le 22 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne, les deux pôles géographiques sont équidistants du Soleil et les jours et nuits ont des durées identiques sur toute la planète. L'été boréal a lieu, à notre époque, lorsque la Terre est proche de l'aphélie, où son mouvement orbital est le moins rapide, et les mois de printemps et d'été (passant d'un équinoxe à l'autre) comptent par conséquent 7 jours de plus que ceux d'automne et d'hiver. La situation est inverse dans l'hémisphère austral où la saison froide, qui prévaut à ce moment là, compte 7 jours de plus que la saison chaude correspondante.

Les valeurs de *e* et de ε ne sont pas fixes, mais varient dans le temps. L'attraction combinée de la Lune et du Soleil perturbent le gyroscope terrestre et induisent une précession, ou déplacement de l'orientation de son axe, donc aussi de la ligne des équinoxes, avec une période de 25 800 ans. Si, dans l'hémisphère boréal, nous disposons maintenant d'une «étoile polaire», ce fait n'est que passager. En l'an 14980, ce sera au tour de la brillante étoile Véga de devenir notre étoile polaire. Ce mouvement de précession est accompagné par une lente variation de l'obliquité ε selon une période de 41 000 ans dans l'intervalle angulaire de 21.5° à 24.5°. Les perturbations dues aux autres corps du système solaire provoquent aussi une lente précession du périhélie dans le sens opposé à la précession des équinoxes et, notamment, une variation de l'excentricité *e* dans les limites ~0 à ~0.06 avec une périodicité de 100 000 ans. Trois périodes fondamentales, 26 000 ans, 41 000 ans et 100 000 ans sont donc associées à l'ensoleillement saisonnier de notre planète.

Toutes ces variations ont un effet négligeable sur l'ensoleillement global de la Terre au cours d'une année. Mais les effets locaux peuvent être importants. Plus l'obliquité de l'écliptique est grande, plus le contraste entre été et hiver sera grand pour un hémisphère donné; surtout si ces saisons ont lieu à proximité du périhélie et de l'aphélie. L'insolation estivale peut par exemple varier dans un intervalle de 20% pour une latitude donnée. La variation, d'origine astronomique, du *contraste* saisonnier d'ensoleillement, et son rôle possible d'initiateur de changements climatiques capables de conduire à des époques glaciaires, a inspiré les investigations de plusieurs chercheurs. On peut nommer Joseph Alphonse Adhémar (env. 1840), Urbain Leverrier (1843), James Croll (1864). Mais c'est le mathématicien yougoslave Milutin Milankovitch (1878-1958) qui poussa le plus loin ces recherches. Après avoir consacré 30 ans de sa carrière à utiliser les paramètres orbitaux pour calculer l'évolution des bilans radiatifs pour toute une série de latitudes, il publia une synthèse de ses résultats dans un livre en 1941. Il montra, par exemple, que les divers facteurs agissent de manière différente selon la latitude. La précession de 22 000 ans (valeur «effective» de celle de 25 800 ans à cause de l'action conjointe de la précession du périhélie) agit principalement dans les zones équatoriales; le cycle de 41 000 ans de l'obliquité agit dans le sens inverse et affecte plus les zones polaires. A l'époque où Milankovitch publia son livre, on ne disposait pas des moyens d'investigation capables de détecter avec finesse les mouvements glaciaires, et de tester ainsi les prédictions de son modèle. Son travail tomba dans l'oubli, et il fallut attendre les années 70 pour avoir les premières confirmations crédibles.

Il est notoirement difficile d'étudier la séquence temporelle des traces de glaciations sur les terres émergées continentales; chaque nouvelle avance des glaciers tend à effacer la plupart des traces de la glaciation précédente. La solution à ce problème est venue de l'étude des sédiments marins qui, moins bousculés par l'action mécanique des plaques de glace en mouvement, ont enregistré une chronologie des événements climatiques sur des centaines de milliers d'années. La clé se trouve dans le rapport isotopique $^{18}O/^{16}O$ de l'oxygène contenu dans le carbonate de calcium ($CaCO_3$) constituant les coquilles d'êtres microscopiques du plancton marin, les foraminifères. L'isotope le plus courant de l'oxygène est ^{16}O, mais il existe aussi dans la nature des traces de cet élément sous forme de l'isotope plus lourd ^{18}O. Les molécules d'eau qui incorporent un atome ^{18}O s'évaporent moins facilement que les autres et tendent à être concentrées par la distillation. Si les masses glaciaires ne varient pas d'une année à l'autre, l'isotope ^{16}O évaporé retourne à la mer à chaque refonte. Si la glaciation tend à croître, par contre, cet isotope y reste piégé et on assiste à une augmentation de la concentration en ^{18}O dans les mers. *Un rapport isotopique $^{18}O/^{16}O$ grand indique ainsi un volume glaciaire global accru.* C'est en utilisant cette technique que Cesare Emiliani mit en évidence, au début des années 1950, un cycle de 100 000 ans pour les sept dernières glaciations, soit la périodicité liée à l'excentricité *e*. Par la suite, au début des années 70, il devint possible d'effectuer un calage absolu de la chronologie des couches sédimentaires à l'aide des traces d'inversions du champ magnétique terrestre et de leur datation précise par la méthode du ^{40}K - ^{40}Ar. Ceci permit à James D. Hayes, John Imbrie et Nicholas J. Shackelton, en 1976, de comparer directement les prévisions de Milankovitch avec les estimations de la masse glaciaire (fig. 5). Ils confirmèrent un excellent accord avec les cycles de 100 000 et de 41 000 ans, mais trouvèrent que le cycle de 22 000 ans était mieux représenté par un double cycle de 24 000 et 19 000 ans. L'astronome belge André Berger améliora alors le calcul de la précession, et confirma ces deux dernières périodes. Il semble donc bien établi, aujourd'hui, que les époques glaciaires aient été modulées par le comportement orbital de la Terre. En ce qui nous concerne, nous vivons une époque interglaciaire et, si les prévisions de la théorie se maintiennent, nous devrions aborder une nouvelle glaciation d'ici 7000 à 8000 ans qui culminera dans quelque 23 000 ans. Toutefois, ce type de prévision repose sur des tendances observées à long terme et n'est pas nécessairement aussi simple à formuler dans un cas isolé.

Fig. 5: Variations cycliques de l'orbite terrestre. Prédictions d'insolation estivale pour de hautes latitudes boréales d'après la théorie de Milankovitch. A des périodes d'insolation élevée correspondent des époques interglaciaires (d'après W.S Broeker et G.H. Denton)



Le système solaire: le rôle du bombardement météoritique.

Notre système solaire s'est formé il y a environ 4.6 milliards d'années à la suite de l'effondrement d'un grand nuage d'hydrogène, d'hélium ainsi que d'une faible proportion d'éléments plus lourds (env. 2%) contenus en partie dans la poussière interstellaire associée au nuage gazeux. 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 grand nuage interstellaire engendre plusieurs étoiles plutôt qu'un seul objet. L'amas ainsi formé peut comprendre une dizaine à plusieurs centaines d'étoiles. Les interactions gravifiques entre les membres de l'amas permettent occasionnellement à une étoile d'atteindre une vitesse suffisante pour quitter l'amas; ce dernier «s'évapore» peu à peu. Il est vraisemblable que notre Soleil se soit ainsi échappé il y a bien longtemps de son lieu de formation. Notre système solaire est constitué par le Soleil accompagné des planètes, qui ne représentent en fait que quelque 2% de la masse de celui-ci, et de plusieurs milliers d'astéroïdes et d'innombrables comètes qui forment le présumé «nuage d'Oort», constitué de quelque deux masses terrestres de corps cométaires, situés loin au-delà des planètes les plus éloignées, à des distances entre 10^4 et 10^5 Unités Astronomiques (une UA = distance moyenne Terre-Soleil). Les 9 planètes que nous connaissons sont un résidu de la formation du Soleil. Les planètes ont elles-mêmes été formées par l'accumulation, ou l'accrétion, de débris disparates qui se trouvaient en orbite autour du jeune Soleil. Cette accrétion s'est déroulée par le biais d'impacts souvent très violents (on pense maintenant que notre Lune a été formée par l'impact d'un objet de la grandeur de la planète Mars avec la Terre très tôt dans son histoire). L'énergie cinétique de ces impacts a contribué à élever suffisamment la température des planètes rocheuses (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) pour les liquéfier et permettre la différentiation radiale de leur composition chimique. Les éléments les plus lourds se sont concentrés dans les régions centrales, tels par exemple les «sidérophiles»: Fer, Nickel, Cobalt et les éléments voisins de l'Or et du Platine (Iridium, Osmium, Ruthénium,..); les composés plus légers sont restés à la surface à la manière d'une écume. Cette chaleur fossile réside encore dans les profondeurs de notre planète, et elle est entretenue par la décomposition de ce qui reste des éléments radioactifs qui étaient 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 depuis 3 ou 4 milliards d'années (par exemple la Lune, ou Mercure, fig. 6) en sont des témoins éloquents. Les débris

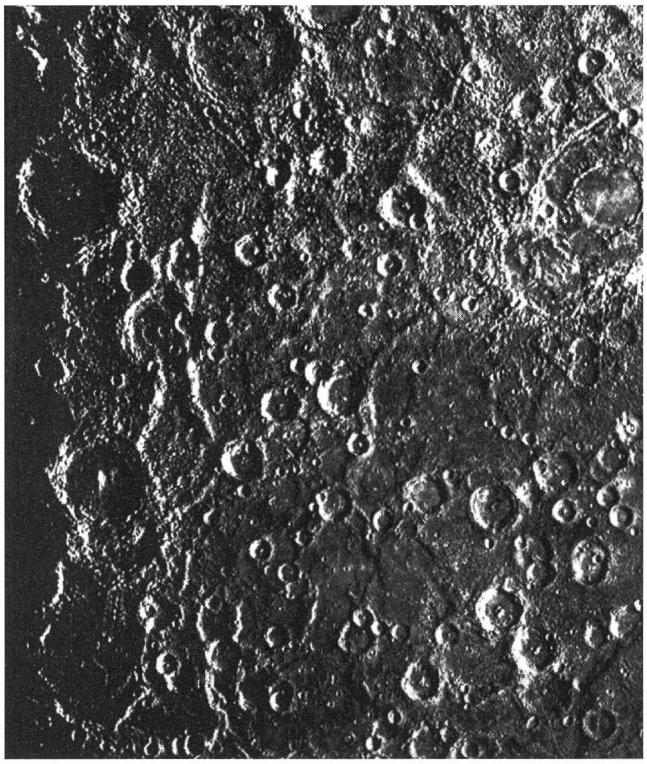


Fig. 6: Surface de la planète Mercure.

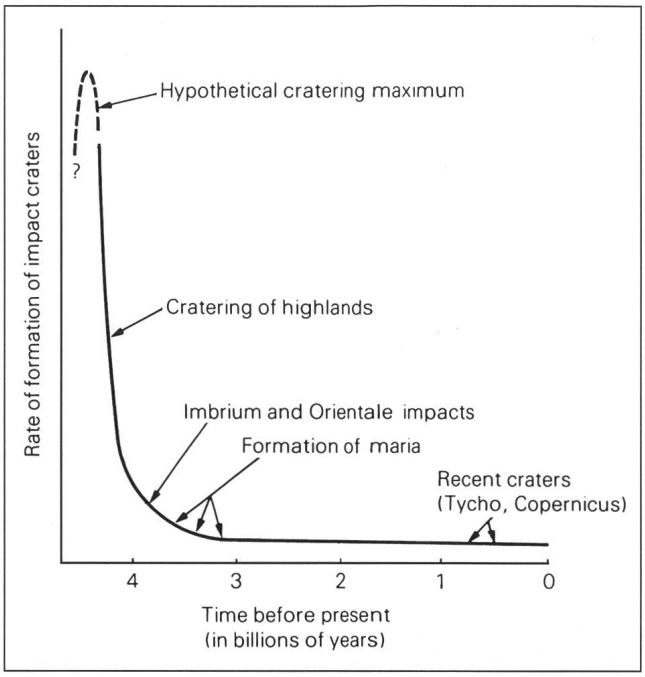


Fig. 7: Taux de formation des cratères d'impact lunaires au cours du temps (d'après G. Abell, D. Morrison et S. Wolff).

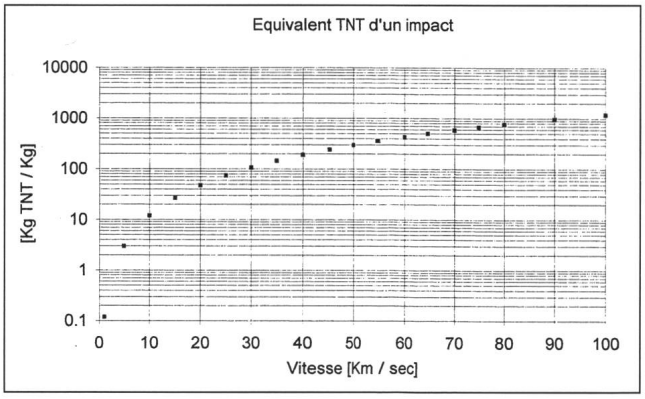
circulant dans le système solaire ont peu à peu fini par être balayés de la sorte et, de nos jours, il n'en subsiste qu'une faible proportion (fig. 7) susceptible d'entrer en collision avec une planète. En ce qui concerne la Terre, cette incidence est faible mais loin d'être négligeable:

- Chaque jour, 100 à 1000 tonnes de météorites pénètrent dans l'atmosphère terrestre.
- 10^{12}, ou plus, 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 100 tonnes ou plus, susceptibles de former des cratères appréciables au sol, tombent chaque année.

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

L'énergie cinétique d'une météorite, compte tenu des vitesses qu'ont habituellement les corps qui parcourent le système solaire, peut être considérable. Notre Terre se déplace le long de son orbite avec une vitesse moyenne d'environ 30 km/s. Au niveau de notre orbite, la vitesse d'évasion du potentiel solaire est de l'ordre de 42 km/s (618 km/s à la surface du Soleil). De plus, un corps qui chute sur la Terre subit une accélération supplémentaire de la part du champ gravifique terrestre. Dans le cas limite, sa vitesse est incrémentée de la vitesse d'évasion terrestre, qui vaut un peu plus de 11 km/s. Dans la moyenne, les météorites pénètrent dans l'atmosphère avec une vitesse d'environ 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 avec la résistance de l'air, 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 «pire» des cas, 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 peut atteindre, comme on l'a vu plus haut, des valeurs proches de 80 km/s. A une telle vitesse, chaque kg de matière recèle une énergie cinétique équivalente à quelque 800 kg de TNT! (un kg de TNT libère $4.2 \cdot 10^6$ joules, voir fig. 8). Des corps relativement petits, tel une météorite ferreuse d'un rayon de 3.5 m, sont alors capables de provoquer les mêmes dégâts qu'une charge nucléaire stratégique d'une mégatonne. Même si ce cas extrême est rare, un nombre appréciable d'événements hautement énergétiques ont lieu chaque année (fig. 9a, b). Le cas le plus célèbre de ce siècle est

Fig. 8: Equivalent TNT de l'énergie cinétique d'un projectile d'un kg. (1kg de TNT dégage $4.2 \cdot 10^6$ Joules).



l'événement du 30 juin 1908 à Tunguska, en Sibérie, où un bolide explosa proche du sol en libérant une énergie équivalente à 12 mégatonnes de TNT, rasant la forêt sur plus de 30km à la ronde. Le fait que ce bolide n'ait pas atteint le sol et laissé de cratère a fait penser qu'il s'agissait d'un petit noyau cométaire; mais des études plus récentes (C. Chyba, NASA) suggèrent plutôt une grande météorite pierreuse, ou chondrite, de quelque 30 m de diamètre. Un tel corps, de cohésion relativement faible, peut être disloqué de manière explosive en d'innombrables fragments par le choc de la pénétration dans la basse atmosphère.

De nombreuses traces d'impacts météoritiques existent sur Terre malgré l'importance des processus érosifs qui prévalent à sa surface. On dénombre aujourd'hui plus d'une centaine de grands cratères avec des diamètres de quelques centaines de mètres à plus de cent kilomètres et des âges allant jusqu'à quelques centaines de millions d'années. Beaucoup de cratères sont dissimulés par la nature du relief environnant (régions montagneuses, forêts, accumulation de sédiments lacustres, fonds marins, etc) ou ont été éffacés par la dérive des plaques continentales. Certaines régions par contre, tel le territoire canadien où une campagne de reconnaissance aérienne avait été organisée dans ce but durant les années 1950, ont été dénudées par des glaciations successives. Ceci a mis en évidence les traces inscrites dans la structure de la roche sous-jacente: cratères de Holleford (2 km), Brent (3 km), New Quebec (3 km), West Hawk Lake (4 km), Deep Bay (12 km),

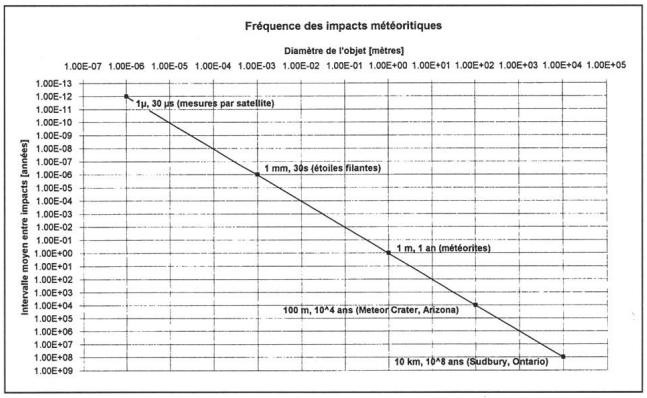
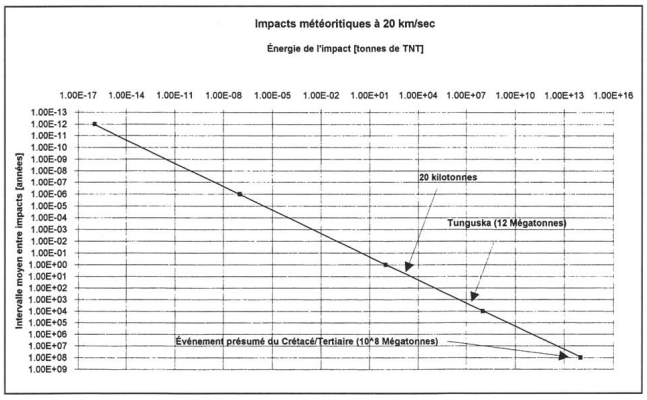


Fig. 9: a: Fréquence d'impacts météoritiques en fonction de la dimension de l'objet.
b: En fonction de l'énergie (équivalent en tonnes TNT).



Lac Couture (14 km), Clearwater Lakes (32 km et 22 km), Carswell (32 km), Manicouagan (65 km), Sudbury (140 km) entre autres. A ces cratères bien identifiés s'ajoutent encore les formations remarquablement circulaires du Golfe de Saint Laurent (350 km) et la côte orientale de la Baie de Hudson (300 km).

L'idée d'événements catastrophiques ayant affecté la biosphère est ancienne (le mythe du déluge, par exemple), mais le premier traitement scientifique du problème revient certainement au Baron Georges Cuvier (1769-1832) qui fut frappé par les nombreuses discontinuités 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 âprement contestée par le géologue anglais Sir Charles Lyell (1797-1873), inspirateur de Charles Darwin, qui invoquait l'action prolongée de processus graduels et lents. Ce furent les partisans de Lyell qui emportèrent le débat, et l'*uniformitarisme* imprègne encore de nos jours la pensée des géologues. Ce rejet de la notion de catastrophisme a contribué à inhiber l'acceptation de facteurs extraterrestres. Jusque dans les années 1960, certains spécialistes n'admettaient l'existence que de moins d'une dizaine de cratères d'impact sur la surface terrestre; la majorité étant considérée comme 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 la question. L'idée de catastrophes à l'échelle planétaire engendrées par des chutes de météorites a été exprimée à de nombreuses reprises. On peut mentionner, parmi d'autres, les travaux de l'astronome irlandais E.J. Öpik (1951), du paléontologue canadien Digbey McLaren (1970) et du 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 auquel nous assistons en ce moment, est à attribuer au physicien Luis W. Alvarez et à son fils, le géologue Walter Alvarez.

Vers la fin des années 70, Walter Alvarez étudiait 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). L'idée était d'utiliser les méthodes d'analyse très sensibles dont disposaient les laboratoires de chimie nucléaire de Berkeley pour mesurer la concentration des éléments sidérophiles, notamment de l'Iridium, présents dans ce dépôt. Ces éléments sont rares à la surface terrestre car ils ont été entraînés vers son noyau, avec le Fer, lors de la différentiation chimique de notre planète. Ils sont, par contre, beaucoup plus abondants dans les météorites. 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 qu'a nécessité la formation du dépôt. A la surprise générale, le taux d'Iridium mesuré s'élevait d'un facteur 300 à la base de chaque échantillon du dépôt, pour retrouver graduellement sa valeur initiale à la surface de la couche (fig. 10). Cet apport massif d'Iridium 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 environ 65 millions d'années avant notre ère, et qui a causé la disparition d'innombrables espèces animales, dont les grands reptiles.

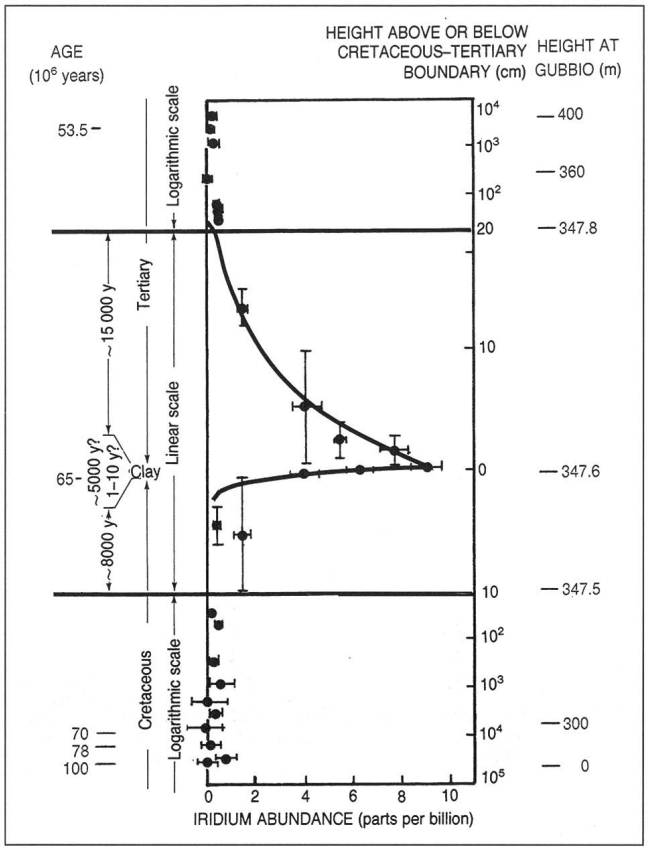


Fig. 10: Distribution de la concentration en Iridium dans des sédiments de la transition Crétacé-Tertiaire à Gubbio (d'après L. et W. Alvarez).

Une estimation de la quantité totale d'iridium contenue dans la couche d'argile répartie sur toute la surface terrestre (quelque 500 000 tonnes d'Iridium) et, compte tenu de l'abondance moyenne de cet élément dans les météorites (0.5 ppm), à conduit ces chercheurs à postuler la chute d'un astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre. Avec une vitesse de l'ordre de 20 km/sec, un tel impact dégagerait une énergie équivalente à environ 10^8 mégatonnes de TNT - loin au-delà de ce que nous sommes capables de produire avec tous nos moyens technologiques actuels. L'impact aurait causé l'éjection d'une énorme quantité de poussière 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 baisse (20°C à 40°C) de la température ambiante globale. Le passage du bolide à travers l'atmosphère et la chaleur de l'impact auraient en outre produit de grandes quantités d'oxydes d'azote qui, selon une estimation d'un groupe du MIT, ont provoqué des pluies suffisamment acides pour dissoudre les coquilles calcaires de mollusques marins.

Ce scénario engendre un certain nombre de prédictions qui doivent être vérifiées. Luis Alvarez en mentionne une quinzaine; les principales sont les suivantes:

- La répartition de la couche d'Iridium doit être mondiale.
- L'impact d'un bolide de 10 km de diamètre doit être probable dans un laps de temps de 65 millions d'années (voir fig. 9).
- Les surabondances d'Iridium doivent être rares dans la stratigraphie globale.
- Cette surabondance doit partout se trouver dans la même zone d'inversion magnétique (coïncidence dans le temps).
- La couche d'Iridium doit apparaître aussi bien dans les sédiments marins que dans les dépôts qui étaient émergés à l'époque.
- Les rapports d'abondances des éléments rares, et en particulier ceux caractérisant les météorites, doivent être identiques dans la couche d'argile à l'échelle planétaire.
- La couche doit contenir du quartz choqué dont la formation caractérise un impact explosif, et non un processus lié à une éruption volcanique.

Toutes ces prédictions ont pu être confirmées, et de nouveaux indices sont entre temps venus renforcer l'hypothèse d'une extinction massive des espèces animales provoquée, il y a 65 millions d'années, par la chute d'un astéroïde de 10 à 15 km de diamètre. Cette explication est favorisée actuellement par une majorité de la communauté scientifique, bien que les défenseurs d'une cause «terrestre» ne soient pas à court d'arguments (par exemple l'intense activité volcanique qui a formé les «trapps» du Deccan, en Inde, il y a également quelque 65 millions d'années). L'embarras majeur qui affectait cette hypothèse était l'absence d'un «coupable», c.-à-d. d'un cratère d'un diamètre voisin de 200 km. Les impacts météoritiques produisent en effet des formations dont le diamètre atteint 15 à 20 fois celui du projectile.

En 1981, les géologues G.T. Penfield et Z.A. Camargo rapportèrent, 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. 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. Ce n'est que dix ans plus tard que d'autres équipes de géologues confirmèrent cette hypothèse. Plus récemment, la découverte de traces de raz de marée et de quartz choqué sur les îles de Cuba et d'Haïti, de dépôts provenant de raz de marée à l'intérieur de la côte des USA bordant le golfe du Mexique, d'enrichissement en Iridium de roches ayant été fondues par l'impact au Yucatán et, finalement, une datation très précise de l'époque de cristallisation de ces dernières par la méthode $^{40}Ar/^{39}Ar$ qui situe l'événement à 65.2±0.4 millions d'années dans le passé, laissent de fortes présomptions concernant le «coupable» mentionné plus haut. Une question subsiste encore: était-il seul?

Notre voisinage stellaire: le rôle des supernovae.

Toutes les étoiles finissent par mourir. Certaines, moins massives que notre Soleil, n'ont guère évolué depuis leur apparition peu après la naissance de notre Univers. Notre Soleil conservera sa jeunesse encore quelques milliards d'années. D'autres, plus massives, dilapident leurs ressources en quelques millions d'années. Les phases terminales d'une vie d'étoile dépendent de sa masse. On admet aujourd'hui que les étoiles dont la masse initiale dépasse huit fois celle du Soleil finissent leur existence avec une explosion supernova. Une telle explosion de «type II» libère une énergie de l'ordre de 10^{46} Joules (les supernovae de «type I» obéissent à un autre mécanisme impliquant un transfert de matière dans un système double, les énergies libérées sont d'environ 10^{44} Joules). Or, notre Soleil ne produit «que» quelque 10^{34} Joules par année. Une supernova de type II libère donc en quelques

secondes autant d'énergie que produirait notre Soleil s'il continuait à briller, comme maintenant, pendant au moins mille milliards d'années! Toute cette énergie n'est pas libérée sous forme «visible»; en fait, la majeure partie se dissipe sous la forme de neutrinos qui n'interagissent pratiquement pas avec la matière. Un pour-cent de l'énergie totale s'échappe sous forme cinétique et seulement un dix millième environ sous forme lumineuse (~10^{42} Joules). Il est certain que la proximité, même temporaire, de cent millions de Soleils peut être malsaine pour notre biotope. Un des premiers à proposer cette hypothèse comme agent responsable de crises écologiques fut le paléontologue allemand Otto Schindewolf, en 1962. Certains chercheurs ont essayé d'évaluer la probabilité pour notre système solaire de se trouver à proximité d'une supernova. Selon des travaux récents, la probabilité de se trouver à 100 années lumière d'une explosion supernova serait un événement par 750 millions d'années. Cette distance est trop grande pour que l'explosion soit dangereuse, et il semble que ce type de phénomène soit un facteur mineur dans le risque encouru par notre planète. On peut toutefois se demander si des traces d'anciennes explosions supernova se sont inscrites, d'une manière ou d'une autre, dans le registre géologique.

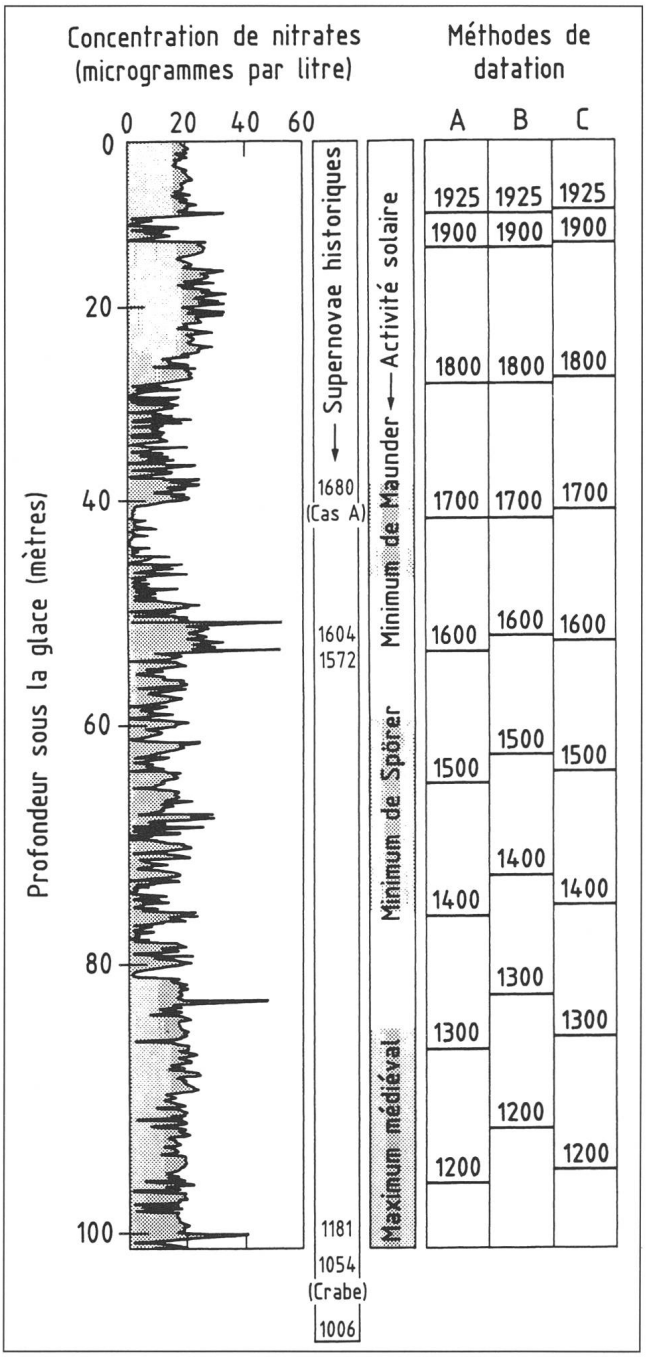
Une supernova émet un «flash» de rayonnement X et γ dans les phases initiales de l'explosion. La durée et l'intensité de ce flash sont encore mal définies par les estimations théoriques, mais il est certain que son flux total est très important. D'après les modèles chimiques, ce flux accru de rayonnement ionisant dans la haute atmosphère terrestre doit provoquer des interactions entre l'Azote et l'Oxygène et conduire à une réduction de la quantité d'ozone. En particulier, on devrait observer un accroissement de l'ion nitrate (NO_3^-). C'est effectivement ce que semblent montrer des carottages faits dans les glaces du continent Antarctique (fig. 11). La concentration de nitrates mesurée jusqu'à une profondeur de 100 m (précipitations de ces dernières 1150 années) confirment les variations de l'activité solaire sur cette période mais présentent, en plus, quatre pics bien définis. Ces accidents dans la répartition temporelle de la concentration des nitrates atmosphériques coïncident de manière étonnante avec les dernières supernovae. On note sur la figure 11 l'absence d'un pic en 1680, qui correspond à la date présumée de la supernova associée à la radiosource Cas A. Cet événement n'a pas été observé à l'oeil nu car sa source est masquée par de grandes quantités de poussière interstellaire. Il se pourrait que cette supernova ait été de type II, dont le rayonnement de haute énergie est intrinsèquement moins intense, et que la quantité de matière interstellaire répartie sur la ligne de visée en ait suffisamment atténué le flux. Le pic vers l'an 1300 pourrait correspondre à une supernova qui a été visible uniquement depuis l'hémisphère austral. Deux restes de supernovae (G278.5-0.5 et MSH11-54) ont été proposés comme candidats possibles. L'avenir nous dira si l'interprétation de ces résultats est correct; «l'archéologie» des supernovae promet d'être un domaine intéressant.

Conclusion.

Notre environnement vital, fragile «film» qui recouvre notre planète, doit faire face à de nombreux périls présents tant dans le déroulement des mécanismes géophysiques qui opèrent dans les profondeurs du globe terrestre, que dans ce qui peut nous venir de l'espace interplanétaire ou interstellaire. Sa fin est inexorablement liée à l'évolution du Soleil. Comme on l'a vu, d'autres facteurs peuvent précipiter cette échéance. Le registre géologique montre que de nombreux bouleversements ont eu lieu, mais que la vie a toujours trouvé moyen de survivre, et même de renforcer sa présence. En ce qui concerne l'humanité, que la biosphère soit condamnée dans quelques millions d'années, ou dans un milliard ou deux, importe peu. Le plus grand péril qui la menace réside en elle-même, et les échéances sont infiniment plus courtes.

NOËL CRAMER

Fig. 11: Corrélation entre des pics de concentration de nitrates dans les glaces Antarctiques et l'apparition de supernovae historiques (d'après T. Montmerle et N. Prantzos)



Quelques grandeurs

Principaux constituants de l'atmosphère:

N_2	78% par volume
O_2	20.9%
Ar	0.93%
CO_2	0.033%
	+ traces d'autres gaz (Ne, He,...)

Masses:

Atmosphère:	5.1×10^{18} kg
Glace:	$25 - 30 \times 10^{18}$ kg
Océans:	1.4×10^{21} kg
Terre (total)	5.97×10^{24} kg

L'atmosphère représente environ:

- 1/5 à 1/6 de la masse d'eau sous forme de glace
- 3.6×10^{-3} de la masse des océans
- environ 10^{-6} de la masse de la Terre

En termes de masse, le milieu océanique est de loin la partie la plus importante de la biosphère.
L'atmosphère est équivalente à une «montagne» cubique de 125 km de côté.

Bibliographie.

Alvarez, L.W., 1987, *Mass extinctions caused by large bolide impacts*, Physics Today / July 1987.

Alvarez, W., Asaro, F., 1990, *An Extraterrestrial Impact*, Scientific American, October 1990.

Beatty, J.K., 1991, *Killer Crater in the Yucatan?*, Sky and Telescope, July 1991.

Broecker, W.S., Denton, G.H., 1990, *What Drives Glacial Cycles?*, Scientific American, January 1990.

Caldeira, K., Kasting, J.F., 1992, *The life span of the biosphere revisited, Nature,* Vol. 360, December 1992.

Chapman, C.R., Morrison, D., 1989, *Cosmic Catastrophes*, Plenum Press.

Courtillot, V.E., 1990, *A Volcanic Eruption*, Scientific American, October 1990.

Foukal, P.V., 1990, *The Variable Sun*, Scientific American, February 1990.

Friedman, H., 1986, *Sun and Earth*, Scientific American Library.

Grieve, R.A.F., *Impact Cratering on the Earth*, Scientific American, April 1990.

Horgan, J., 1991, *In the Beginning*, Scientific American, February 1991.

Kasting, J.F., 1993, *Earth's Early Atmosphere*, Science, Vol. 259, February 1993.

Kerr, R.A., 1992, *Huge Impact Tied to Mass Extinction*, Science, Vol. 257, August 1992.

Mark, K., 1987, *Meteorite Craters*, The University of Arizona Press.

Montmerle, T., Prantzos, N., 1988, *Soleils Eclatés*, Presses du CNRS.

Officer, C., 1993, *Victims of volcanoes*, New Scientist, 20 February 1993.

Raup, D.M., 1986, *The Nemesis Affair*, W.W. Norton & company.

Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G., Maeder, A., 1992, *New grids of stellar models from 0.8 to 120 M☉ at Z=0.020 and Z=0.001*, Astronomy and Astrophysics Supplement, 96, 269.

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.

Stanley, S.M., 1987, *Extinction,* Scientific American Library.

Swinburne, N., 1993, *It came from outer space*, New Scientist, 20 February 1993.

Feriensternwarte – Osservatorio CALINA CH-6914 Carona TI

Carona mit der Sternwarte Calina ist ein idealer Ferienort über dem Luganersee gelegen. Die Sternwarte und das zu ihr gehörende Ferienhaus sind vom Frühjahr bis zum Spätherbst durchgehend geöffnet. Ein- oder Mehrbettzimmer mit Küchenanteil oder mit eigener Küche im Ferienhaus können auch von Nichtastronomen belegt werden.

Die Sternwarte ist mit leistungsfähigen Instrumenten für visuelle Beobachtungen und für Himmelsphotographie ausgerüstet. Sie stehen Gästen mit ausreichenden astronomischen Kenntnissen zur Verfügung.

Tagungs- und Kursprogramm 1993

5. - 6. Juni **9. Sonnenbeobachtertagung der SAG**

12. - 13. Juni **Kolloquium;** Thema: Optische Erscheinungen in der Atmosphäre Leitung: Prof. Dr. Paul Wild, Bern

4. - 8. Oktober Einführung in die Astrophotographie
Leitung: Hans Bodmer, Greifensee

11. - 16. Oktober **Elementarer Einführungskurs in die Astronomie,** mit praktischen Uebungen an den Instrumenten in der Sternwarte
Leitung: Dr. Mario Howald - Haller, Dornach

Auskünfte, Zimmerbestellungen, Kursprogramme, Anmeldungen für Tagungen und Kurse:

Feriensternwarte CALINA

Postfach 8, CH-6914 Carona,
Tel.: 091/68 83 47 - 091/68 52 22 (Frau Nicoli, Hausverwalterin)
Technischer Berater: Hans Bodmer, Burstwiesenstr. 37, CH-8606 Greifensee - Tel. 01/940 20 46