

Extinctions et crises biologiques

CHAPITRE XIV

CAUSES ET CONSÉQUENCES DES EXTINCTIONS

Plus d'une cinquantaine de causes ont été invoquées pour rendre compte des extinctions en masse. On peut les regrouper, en trois ensembles :

- les causes internes ou biologiques, liées aux êtres vivants eux-mêmes
- les causes externes terrestres liées aux modifications de l'environnement
- les causes extra-terrestres

Quelles que soient les causes d'une extinction, il faut remarquer qu'une espèce végétale ou animale ne disparaît jamais seule : la disparition d'une espèce entraîne inéluctablement celle d'autres espèces. En effet, chaque espèce fait partie d'un ensemble complexe de chaînes alimentaires et d'interactions ; elle est indispensable au maintien de plusieurs autres espèces, dont la disparition en entraîne d'autres etc... : on peut parler d'un effet « boule de neige » ou « château de cartes », qui a dû jouer de manière particulièrement efficace lors des extinctions en masse.

14.1 Les causes internes

Elles sont très difficiles à mettre en évidence, car elles concernent le matériel génétique des espèces, le plus souvent inaccessible quand il s'agit de fossiles. Pour l'extinction des dinosaures, on a invoqué beaucoup de raisons plus ou moins fantaisistes : gigantisme, stupidité, problèmes dans la biologie de la reproduction (anomalies des coquilles d'œufs, œufs non éclos...), essoufflement évolutif entraînant une baisse des potentialités adaptatives... On peut penser aux fluctuations

Causes et conséquences des extinctions

de la reproduction, à une détérioration génétique (manque de variabilité génétique, dérive génétique), aux dysfonctions sociales, aux maladies (épidémies virales), au parasitisme...

Ces causes ont pu jouer un rôle de première agression qui a fragilisé une espèce ; mais elles ne peuvent affecter que des groupes particuliers dans des aires géographiques particulières et sont donc incapables d'expliquer l'extinction simultanée de nombreux groupes à large répartition. Elles peuvent cependant expliquer le « bruit de fond » des extinctions. Elles peuvent aussi expliquer l'extinction des espèces à petite population, situées au voisinage de la Population Viable Minimum (PVM). La PVM est variable suivant les espèces, mais toujours très basse (quelques dizaines à quelques centaines d'individus).

En revanche, la compétition entre espèces ne semble pas jouer un rôle important dans les extinctions.

14.2 Les causes externes terrestres

Les différentes causes externes possibles sont étroitement liées entre elles. Par exemple, les variations du niveau marin, la géodynamique ou le volcanisme peuvent avoir une incidence sur le climat, directement ou indirectement par une modification des courants marins, donc des circulations atmosphériques. Ainsi, l'ouverture de l'Atlantique Nord à la fin du Crétacé a profondément modifié la circulation océanique globale, ce qui a entraîné un refroidissement planétaire.

a. Facteurs climatiques

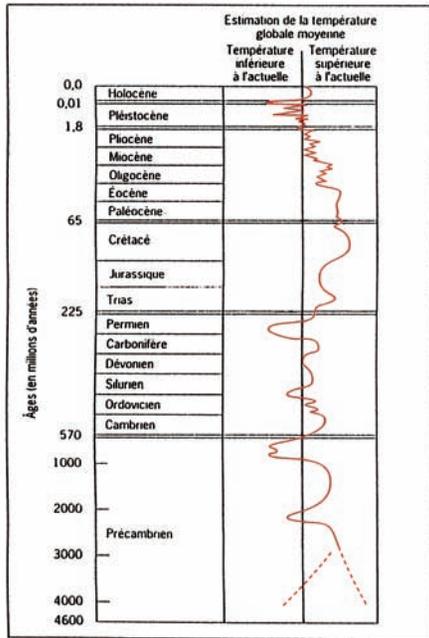
Les modifications du climat peuvent être liées aux changements du niveau marin : une régression entraîne une plus grande continentalité du climat sur les terres émergées, et inversement. Le volcanisme, les poussières interstellaires ou les impacts météoritiques entraînent une baisse des températures par diminution du rayonnement solaire incident ; de plus les longueurs d'onde efficaces (bleu) pénétrant au-delà de 25 m de profondeur dans l'eau et permettant la vie du phytoplancton sont affaiblies. En milieu continental, la biologie de la reproduction peut être altérée par déficit de rayonnement ultraviolet.

Ce sont les variations de la température que l'on apprécie le mieux, du moins pour les périodes pas trop reculées dans le temps (Fig. XIV 1).

Les variations du climat peuvent également changer la taille des espaces disponibles, provoquant une réduction ou un accroissement des zones climatiques.

Les glaciations n'ont d'incidence que si elles ont une extension mondiale. On sait que les glaciations du Quaternaire, qui s'accompagnent d'une importante

Causes et conséquences des extinctions



Différents indicateurs géologiques permettent de retracer l'allure générale de la courbe des changements de température de la Terre depuis son origine, il y a 4,6 milliards d'années. Ils mettent en évidence un climat généralement plus chaud que celui des deux derniers millions d'années.

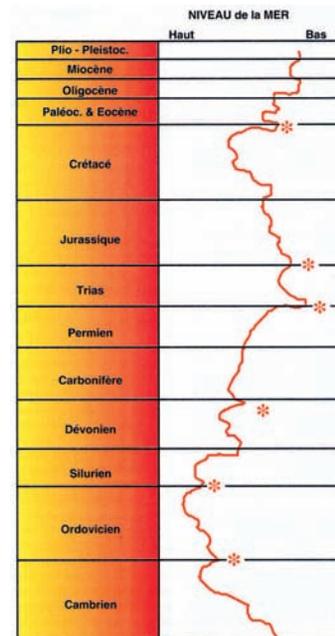
régression marine, n'ont pas eu pour effet d'extinction en masse : les faunes et les flores ont pu migrer pour s'adapter aux changements climatiques, ou bien subsister dans des aires-refuges. Il n'en a pas été de même à la limite Permien/Trias. Pour la limite K/T, on n'a pas mis en évidence de glaciation, mais une baisse des températures de 5 à 7°C, ou selon d'autres auteurs une élévation des températures par effet de serre... Il est très probable que par suite de l'ouverture de l'Atlantique Nord, la pénétration d'eaux froides polaires a eu une incidence sur les faunes particulièrement sensibles à la température. C'est ainsi que l'on peut expliquer la disparition des récifs à rudistes, des lamellibranches, gastéropodes et foraminifères qui constituaient l'essentiel de la faune téthysienne. Les faunes boréales (sédiments marins du Danemark) n'ont été que peu affectées.

Figure XIV 1 : Les variations de la température au cours des temps géologiques

b. Régressions marines

Toute l'histoire de la Terre est rythmée par les alternances d'élévations et d'abaissements du niveau des mers (transgressions et régressions), déterminant des cycles sédimentaires sur lesquels reposent les divisions de l'échelle stratigraphique (Fig. XIV 2). Les variations de la faune viennent à l'appui de ces coupures. Ces variations mondiales du niveau des mers, dites eustatiques, sont liées :

Figure XIV 2 : Cycles sédimentaires (les astérisques marquent les grandes crises biologiques)



Causes et conséquences des extinctions

- pour les plus importantes aux super-cycles faisant alterner regroupement des continents en Pangées, et fragmentation de ces supercontinents puis dispersion des continents ;
- aux variations de la vitesse d'expansion des océans (les dorsales très actives, occupant plus de volume, font « déborder » les océans) ;
- au glacio-eustatisme (l'eau immobilisée sous forme de glace dans les calottes glaciaires ne retourne pas aux océans, dont le niveau baisse).

La tectonique des bassins et de leurs bordures, l'enfoncement ou le soulèvement des continents entraînent des transgressions et régressions locales, qui n'ont pas d'incidence globale sur la biosphère.

Les variations eustatiques entraînent également des variations climatiques. L'intensification de l'érosion et de l'oxydation de la matière organique (décélée par la variation de la composition isotopique du carbone dans les sédiments) sur les continents découverts par une régression réduit la concentration atmosphérique et océanique en oxygène (asphyxie d'espèces marines) et augmente celle du dioxyde de carbone, d'où un réchauffement par augmentation de l'effet de serre.

Les régressions entraînent par retrait des mers épicontinentales la mise à nu de larges zones du plateau continental, domaine particulièrement peuplé : 83% de la biomasse marine est constituée par les espèces benthiques vivant sur les plates-formes. La réduction des aires de peuplement marin augmente la sélection naturelle et aboutit à des extinctions, qui peuvent être massives s'il s'agit d'un phénomène mondial, ce qui est le cas des variations eustatiques. Lorsque le niveau des mers remonte, quelques centaines de milliers d'années plus tard, les habitats côtiers et les îles sont submergés : de nombreuses communautés côtières peuvent alors disparaître.

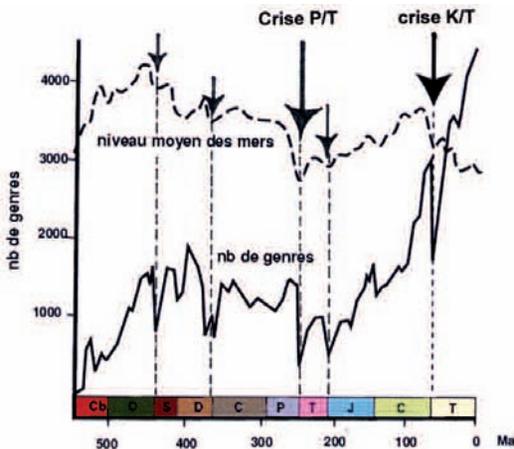


Figure XIV 3 : Crises et régressions marines

S'il y a un accord des stratigraphes sur le rythme de ces fluctuations, les avis divergent sur leur amplitude. Il semble admis que pour les temps phanérozoïques, le niveau le plus élevé ait été atteint au cours du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Turoniens), à 150 – 300 m au-dessus du niveau actuel. Les grandes crises semblent corrélées avec des régressions importantes (Fig. XIV 3). La fin du Crétacé (Maestrichtien) est marquée par une régression d'amplitude importante, bien que l'on reste au-dessus du

Causes et conséquences des extinctions

niveau actuel : 29 millions de km² (à peu près la surface actuelle de l'Afrique) sont découverts. La fin de l'Ordovicien correspond également à un haut niveau, en rapport avec la forte diversification des faunes marines.

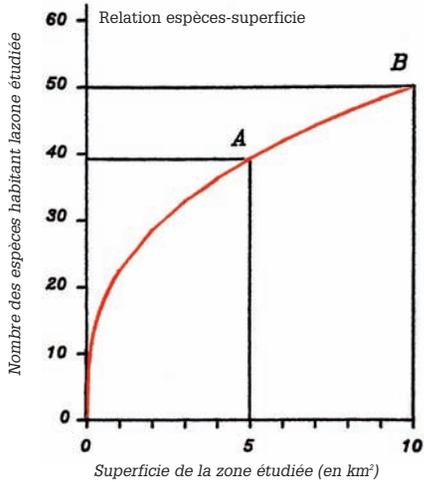


Figure XIV 4 : Relation entre nombre d'espèces et espace disponible

Même si ce n'est pas absolument prouvé, il semble y avoir une relation entre le nombre d'espèces et l'espace disponible. Par exemple, le doublement de la surface disponible pourrait permettre une augmentation de 25% des espèces habitant la zone. Inversement, la réduction de l'espace marin par régression doit donc entraîner des extinctions d'espèces (Fig. XIV 4).

La crise K/T se produit effectivement à la suite d'une régression, mais cette dernière ne peut être la cause unique de la crise : les groupes les plus affectés ne sont pas nécessairement benthiques, les groupes pélagiques payent également un lourd tribut (ammonites et bélemnites nectoniques, foraminifères planctoniques). Inversement, la régression importante du milieu de l'Oligocène n'a pas

d'incidence marquante sur les faunes marines, mais s'accompagne d'un renouvellement des faunes mammaliennes terrestres en Amérique du Nord.

La grande coupure Eocène/Oligocène voit un changement des faunes de mammifères en Europe par suite de l'interaction de deux phénomènes :

- un phénomène tectonique qui relie l'île Europe devenue péninsule aux régions orientales (régression locale due à l'orogénèse alpine), d'où une migration des faunes tropicales de l'est vers l'ouest, la compétition faisant disparaître les faunes éocènes archaïques ;
- une baisse des températures attestée par le rapport isotopique de l'oxygène dans les coquilles marines.

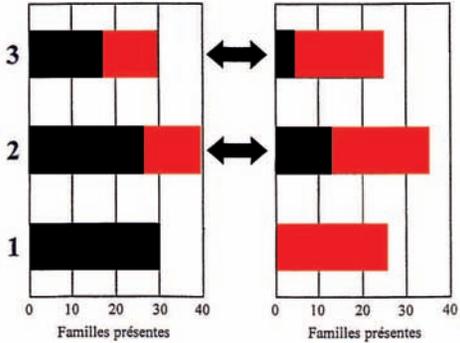
c. Géodynamique globale

La géodynamique globale a produit deux fois au cours des temps phanérozoïques une réunion de tous les continents en un supercontinent unique ou pangée. Cela a entraîné une continentalisation du climat et une réduction des milieux marins côtiers, à l'origine de crise aussi bien pour les faunes marines que continentales.

Par ailleurs, on a vu que les périodes de forte activité des dorsales océaniques entraînent une remontée eustatique du niveau marin.

Causes et conséquences des extinctions

Les ouvertures océaniques peuvent entraîner des changements climatiques par modification des régimes de courants marins, et l'isolement de certains continents. Au contraire, les collisions continentales vont permettre des migrations de faunes continentales, et entraîner un isolement pour les faunes marines.



Conséquences de la formation de l'isthme de Panama (-2,5 Ma) sur les mammifères des Amériques après 50 Ma d'isolement de l'Amérique du Sud. 1 : avant à l'échange ; 2 : pendant l'échange ; 3 : après l'échange en noir les familles sud américaines ; en rouge les familles nord américaines. D'après May (1978)

Figure XIV 5 : Le grand échange américain

Un bon exemple de cette action de la géodynamique sur les faunes est celui du « grand échange américain » (Fig. XIV 5). Pendant la plus grande partie de l'évolution des mammifères, Amériques du Nord et du Sud étaient séparées par un bras de mer. Deux faunes mammaliennes distinctes s'y sont développées, dominées par les marsupiaux au Sud et par les placentaires au Nord. Quelques vagabonds ont pu passer d'un continent à l'autre par l'archipel des Antilles.

Il y a 3 Ma, l'isthme de Panama a émergé et les mammifères ont pu passer d'un continent à l'autre. L'Amérique du Nord était plus peuplée : plus d'espèces sont passées du Nord au Sud que l'inverse. 50% des genres du Sud sont d'origine nord-américaine, alors que 20% seulement des genres du Nord sont d'origine sud-américaine. La réunion des deux continents ne pouvant permettre d'héberger toutes les espèces existant sur les deux avant réunion (voir ci-dessous la « loi des aires »), des extinctions étaient inévitables : la faune totale est devenue plus pauvre qu'elle n'était auparavant. A l'inverse, les animaux marins du golfe du Mexique se sont retrouvés isolés de ceux du Pacifique oriental.

Loi des aires

Il existe une loi non démontrée mais pratiquement toujours vérifiée : le nombre d'espèces vivant dans une aire donnée (île ou parcelle de forêt par exemple) croît de manière logarithmique avec la superficie. Ce nombre double quand la superficie est multipliée par dix. Inversement, si la superficie d'un habitat donné est divisée par dix, la moitié des espèces présentes doivent disparaître. La réduction de la surface émergée d'un continent ou de la plate-forme continentale, ou la mise en communication de deux continents jusque là isolés, vont donc entraîner des extinctions d'espèces. Un changement climatique peut également aboutir à une telle réduction. Ce mécanisme ne joue sans doute pas pour expliquer les extinctions de masse, d'ampleur planétaire ; mais il peut avoir un rôle aggravant

Causes et conséquences des extinctions

en s'ajoutant à d'autres causes. Notons que la réduction actuelle par les activités humaines de la superficie de nombreux habitats naturels (forêt primaire, zones humides...) est certainement l'une des causes de la dramatique réduction de la biodiversité qui est en cours (voir ci-dessus, § XIII.3.f).

d. Volcanisme

Les périodes de grande activité volcanique vont injecter des cendres volcaniques et des aérosols dans la haute atmosphère, d'où une réduction du rayonnement solaire incident et un refroidissement à court terme. À plus long terme, le dioxyde de carbone émis en grande quantité provoque un réchauffement par augmentation de l'effet de serre. Les aérosols acides sont à l'origine de pluies acides qui peuvent avoir une incidence sur la végétation, la reproduction des animaux (destruction des œufs). Les volcans peuvent perturber la circulation atmosphérique, entraîner des incendies, libérer des éléments toxiques, attaquer la couche d'ozone stratosphérique protectrice. Il semble que certaines des grandes crises se produisent dans des périodes de forte activité volcanique (Fig. XIV 6). La crise P/T coïncide avec d'énormes éruptions de basaltes qui ont produit les trapps de Sibérie : 45 coulées en moins de 1 Ma, 400 à 3 500 m d'épaisseur de lave sur 2,5 millions de km², 2 à 3 millions de km³ de lave émis (l'éruption dévastatrice du Laki en Islande, en 1783, en a émis 15 km³, celle du Mt St Helens, en 1980, 1 km³). Des cendres émises par ces éruptions ont été retrouvées jusque dans le Sud de la Chine. Un important volcanisme de subduction se produit aussi à la même époque sur tout le pourtour du Gondwana (partie Sud de la Pangée).

La crise K/T coïncide également avec la crise volcanique qui a formé les trapps du Deccan en Inde. Cet épisode volcanique, qui a duré environ 500 000 ans, est dû au passage du continent indien sous le point chaud qui est actuellement situé sous l'île de la Réunion. Sur une surface voisine du quart de l'Inde, des coulées de basalte se sont superposées sur une épaisseur de plus de 2 500 m. Leur datation est fondée sur quelques

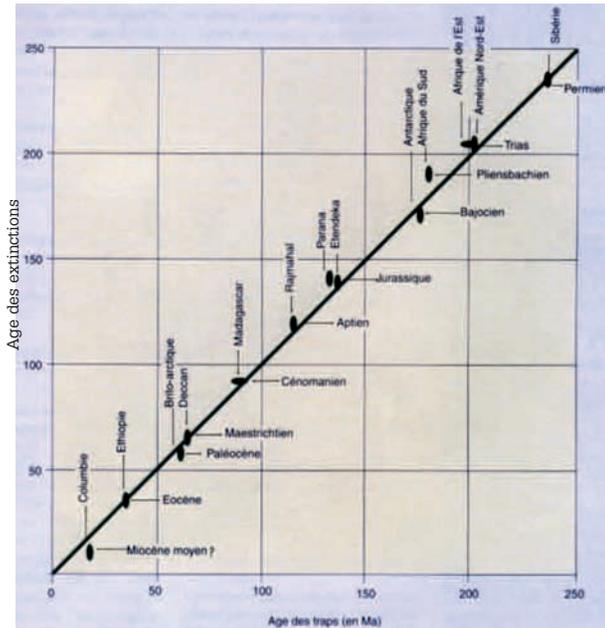


Figure XIV 6 : Crises biologiques et crises volcaniques

Causes et conséquences des extinctions

fossiles dans les couches sédimentaires sous-jacentes ou intercalées, et surtout sur les inversions magnétiques.

A contrario, d'autres crises volcaniques d'une ampleur proche n'ont pas réduit la diversité biologique, que ce soit sur la terre ferme ou dans les océans.

e. Inversions magnétiques

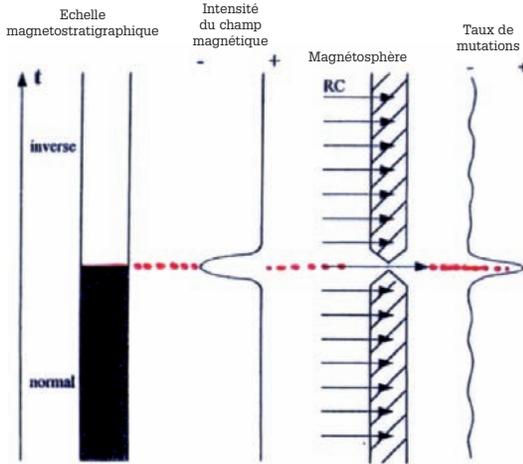


Figure XIV 7 : Effets mutagènes des inversions du champ magnétique

Mais c'est surtout la plus ou moins grande fréquence des inversions du champ magnétique qui semble jouer un rôle. On constate en effet que les deux grandes extinctions P/T et K/T surviennent toutes deux environ 20 Ma après une très longue période de stabilité magnétique (Fig. XIV 8). On pense que la reprise des inversions après ces périodes de calme crée un flux de chaleur supplémentaire à la limite noyau/manteau, à l'origine de panaches ascendants qui produisent 15 à 20 Ma plus tard un volcanisme de point chaud très actif : les trapps de Sibérie et du Deccan auraient cette origine. Volcanisme et inversions magnétiques seraient donc liés.

la Terre et la vie

Les nombreuses inversions du champ magnétique terrestre ne sont pas corrélées avec les grandes extinctions de masse, mais semblent coïncider avec les périodes mineures de renouvellement, qui ont été prises comme limites d'étages dans l'échelle stratigraphique. On comprend que, pendant les quelques centaines ou milliers d'années que dure une inversion, l'absence de champ magnétique dipolaire entraîne une plus grande exposition de la surface terrestre au rayonnement cosmique et au vent solaire, à l'origine de mutations génétiques, d'où des extinctions et renouvellements d'espèces plus nombreux (Fig. XIV 7). Il pourrait également se produire une altération de la couche d'ozone.

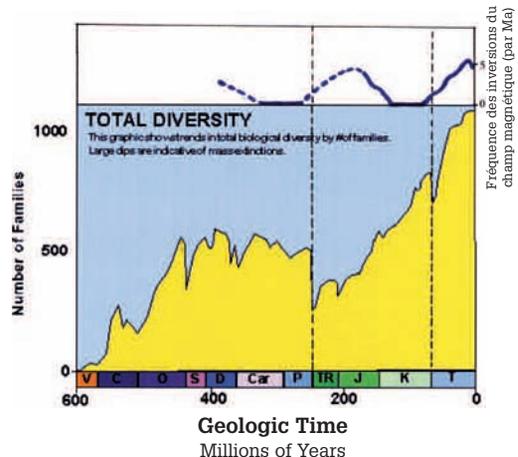
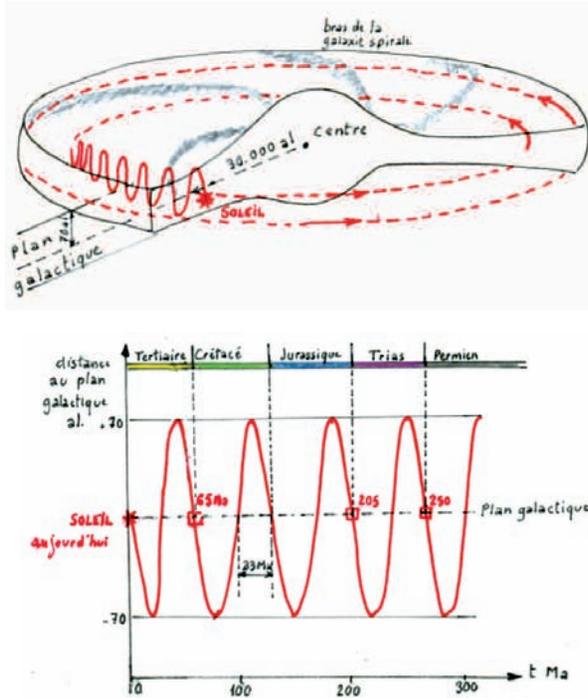


Figure XIV 8 : Crises biologiques et fréquence des inversions magnétiques

Causes et conséquences des extinctions

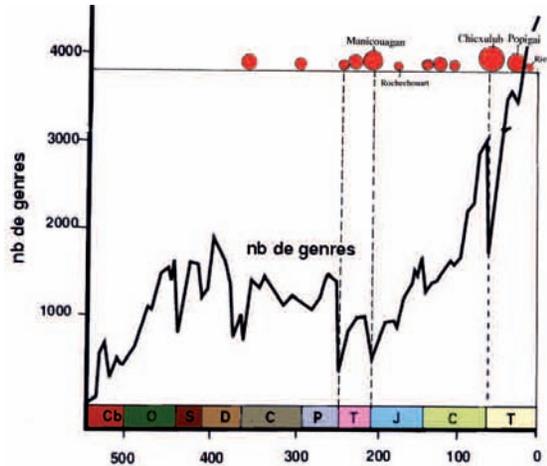
14.3 Les causes extra-terrestres



D'après certains chercheurs, les extinctions suivraient depuis le Permien une périodicité de 26 Ma (ou 28, ou 30), dont la cause est à rechercher en-dehors de la Terre. On a pensé à un rayonnement cosmique accru par l'explosion proche d'une supernova, à des variations du rayonnement solaire émis, à une plus grande fréquence des chutes d'astéroïdes et de comètes, qui pourraient être dues à une étoile naine compagne du Soleil (Némésis), ou au passage périodique du système solaire dans le plan galactique (Fig. XIV 9).

Figure XIV 9 : Trajectoire du Soleil dans la Galaxie

L'hypothèse des impacts météoritiques ou cométaires a connu un regain de faveur, depuis la proposition d'ALVAREZ et al. pour expliquer la crise K/T (voir infra). Depuis, on a détecté d'autres impacts qui semblent corrélés avec la crise de la fin du Dévonien (quartz choqués et microsphérules, preuves d'un impact dans le désert de l'Anti-Atlas marocain), avec la crise P/T et avec la crise de la fin du Trias (quartz choqués et iridium) (Fig. XIV 10).



Les principaux cratères d'impact sont repérés par des cercles proportionnels à leur diamètre

Figure XIV 10 : Crises biologiques et impacts météoritiques

Causes et conséquences des extinctions

Environ 150 cratères d'impact ou astéroïdes importants ont été répertoriés à la surface de la Terre (Fig. II 5). Beaucoup d'autres ont disparu par érosion, sédimentation ou subduction, ou sont invisibles sous les océans ou les calottes glaciaires. Le temps moyen de retour pour un impact créant un cratère de 10 km de diamètre est de 110 000 ans, pour 30 km de 1,2 Ma, et pour 150 km de 100 Ma (Fig. XIV 11).

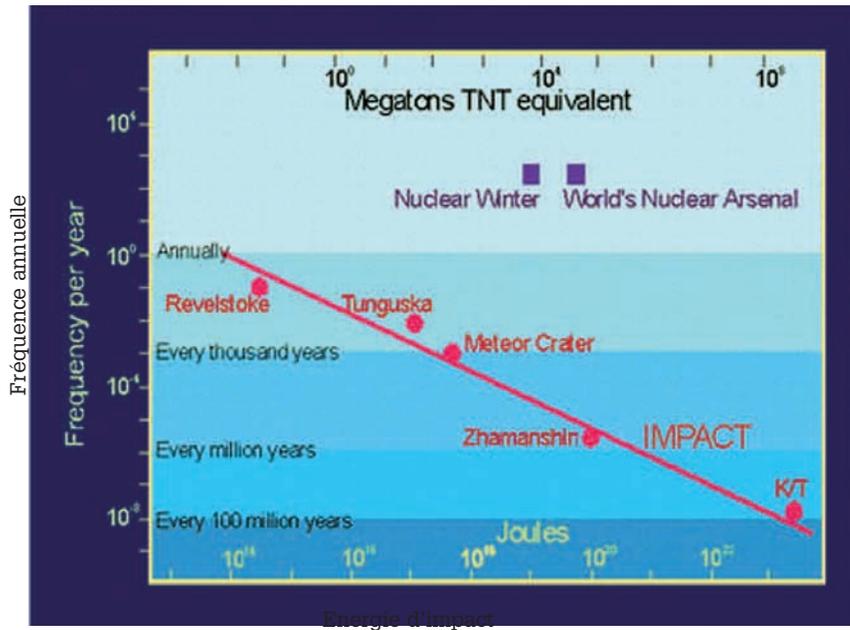


Figure XIV 11 : Fréquence d'impact d'un astéroïde sur la Terre

La puissance des très gros impacts de ce type est difficile à imaginer : pour un objet de 10 km de diamètre, qui va créer un cratère de 150 à 200 km de diamètre, cette puissance équivaut à celle de 5 milliards de bombes de type Hiroshima... (Fig. XIV.12) Les conséquences d'un impact de ce type doivent être dramatiques : vaporisation de la météorite et des roches terrestres du lieu d'impact, projection de fragments ou de roches fondues à des centaines de km, onde de choc, raz-de-marée, pluies acides, feux de forêts, obscurité due à la poussière et à la suie, d'où un refroidissement marqué (scénario analogue à celui de « l'hiver nucléaire »), puis réchauffement par augmentation de l'effet de serre. Il s'agit en tout cas d'un événement bref, qui n'explique pas les disparitions progressives. De tels événements, engendrant des modifications brutales de l'environnement, ont certainement pu jouer un rôle décisif sur des écosystèmes déjà fragilisés par d'autres causes (régression marine, refroidissement climatique...)

Causes et conséquences des extinctions

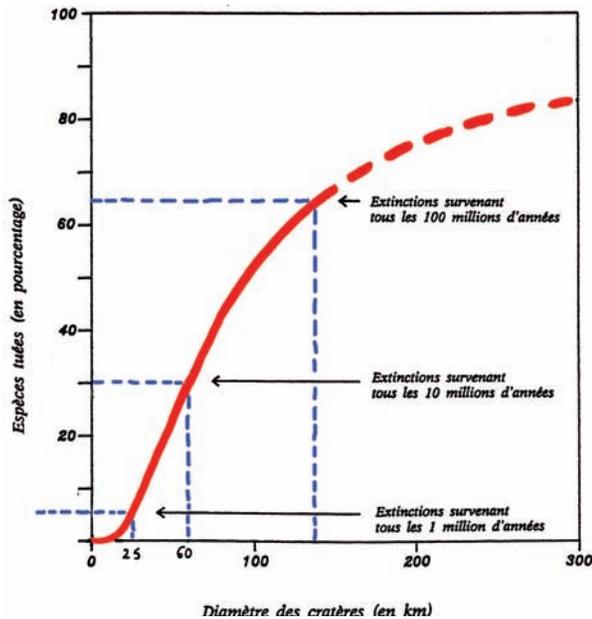


Figure XIV 12 : Relations entre extinctions et dimension des cratères d'impact

14.4 Les causes multiples

Il semble que les grandes crises qui ont affecté la biosphère à plusieurs reprises ne soient pas imputables à une seule cause, mais à la conjonction fortuite de plusieurs causes. Nous prendrons comme exemples la crise P/T, la plus grave qu'ait connue la biosphère au cours du Phanérozoïque, et la crise K/T, la plus célèbre et la plus étudiée.

a. Un scénario pour la crise P/T

L'étude de la grande crise de la limite Permien/Trias est difficile car les couches géologiques de cet âge sont rares, du fait de la grande régression marine. La coupe de référence pour la limite Permien-Trias se trouve à Meishan, en Chine (une centaine de km à l'ouest de Shanghai). Quelques autres sites marins se trouvent en Chine, dans les Dolomites ou en Turquie. Les sites où affleurent des sédiments continentaux sont encore plus rares : il s'agit surtout du bassin du Karoo en Afrique du Sud.

Plusieurs phénomènes géologiques se sont conjugués (Fig. XIV.13) : la réunion des continents en une seule masse continentale ou Pangée s'est accompagnée d'une baisse importante du niveau marin, puis de deux épisodes volcaniques intenses préluant au morcellement de la Pangée qui induit une transgression marine.

Causes et conséquences des extinctions

Cette grande crise se serait produite en trois phases successives (Fig. XIV 13) :

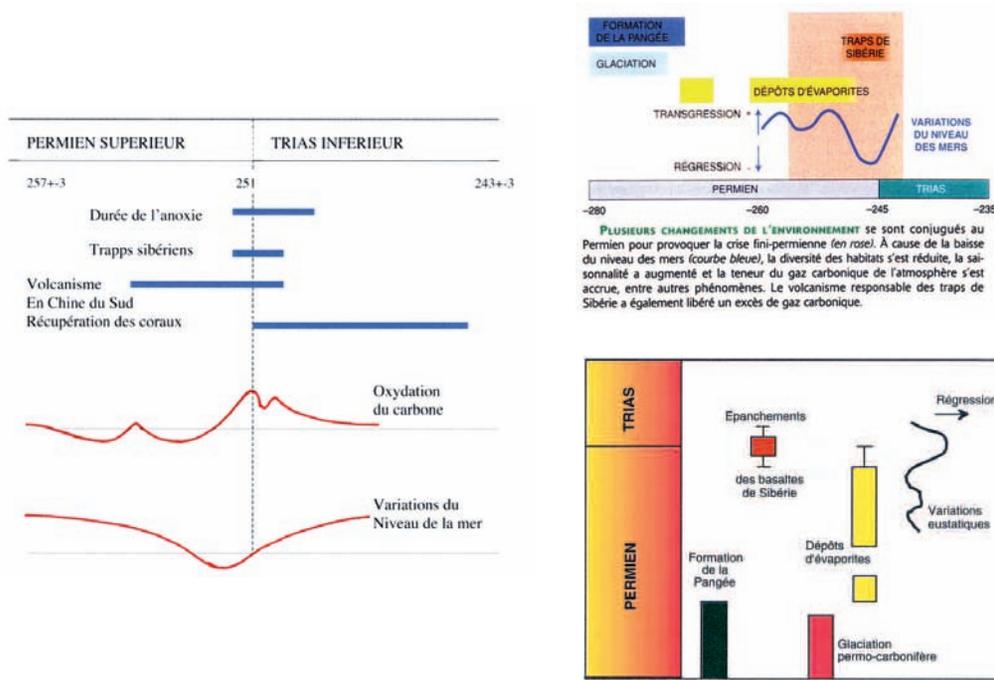


Figure XIV 13 : Les changements de l'environnement à la fin du Permien

- Baisse du niveau marin autour de la Pangée. Le niveau marin au Permien moyen était très élevé (environ 200 m au-dessus du niveau actuel). Il a progressivement baissé à partir de 280 Ma jusqu'à la limite P/T (près de 250 m), entraînant une modification de l'habitat côtier (émersion du plateau continental), une modification des courants qui bouleverse les écosystèmes marins et sur les continents un changement du climat qui devient plus aride, comme en témoignent les dépôts de sel. Il en résulte une première disparition d'espèces spécialisées.
- Au cours de la régression, violentes éruptions volcaniques en deux phases, à l'origine des trapps de Chine du sud (258 Ma), puis de Sibérie (vers 250 Ma) qui a répandu environ 3 millions de km³ de lave. Ce volcanisme libère beaucoup de poussières, d'aérosols soufrés et de dioxyde de carbone, ce qui renforce l'instabilité climatique (refroidissement par les aérosols, puis réchauffement global par effet de serre) et fragilise l'environnement. Les températures auraient

Causes et conséquences des extinctions

atteint 36°C en moyenne annuelle dans la zone tropicale. La libération de méthane, puissant gaz à effet de serre, aurait également pu contribuer au réchauffement : le méthane piégé dans les hydrates des fonds océaniques se serait échappé du fait du réchauffement des eaux océaniques, renforçant l'effet de serre, d'où la fonte d'encore plus d'hydrates etc... Le taux d'oxygène atmosphérique a, lui, fortement chuté.

- Eclatement de la Pangée avec remontée du niveau marin (environ 210 m en 10 Ma) du fait du fonctionnement de nouvelles dorsales océaniques, submersion des plateaux continentaux par des eaux pauvres en oxygène, destruction des habitats côtiers et disparition de nombreux groupes survivants. Les eaux de surface et l'atmosphère ont pu être enrichies par l'hydrogène sulfuré produit par des bactéries anaérobies et par les volcans. Ce poison aurait aussi provoqué des pluies acides et attaqué la couche d'ozone, laissant ainsi passer les rayons ultra-violet très ionisants. Ces conditions difficiles ont achevé la travail d'extinction, mais favorisé en revanche la prolifération « d'espèces désastre » (bactéries encroûtantes responsables de la formation de microbialites), et de généralistes écologiques qui supportent les variations de température et de salinité, capables de s'adapter à des conditions changeantes (brachiopodes comme *Lingula* et *Claraia*, ostracodes comme *Langdaia*).

D'après des études récentes en Chine, la crise se serait produite en deux étapes. La plus marquée, la seconde, se serait produite brutalement – sur une durée d'environ 200 000 ans – il y a 252,6 Ma. Ce pic d'extinction se trouve juste au-dessous de la limite Permien-Trias, fixée par convention à l'apparition du conodonte *Hindeodus parvus*.

Il semble que de plus un important impact météoritique puisse être corrélé avec cette crise. Le cratère d'impact correspondant se trouverait à l'ouest de l'Australie (Bedout Hill) ou à l'est de l'Antarctique. Mais les autres indices d'impact (anomalie d'iridium, quartz choqués, fullerènes) sont controversés.

Les communautés biologiques ont été si désorganisées qu'il a fallu attendre 4 à 5 Ma pour qu'elles se reconstruisent et s'épanouissent, en partie grâce à des « groupes Lazare » comme les oursins (voir infra). Mais la biosphère est radicalement différente à l'issue de cette crise majeure (Fig. XIV 14) : les mers du Permien étaient essentiellement peuplées d'animaux fixés, à part les poissons et les trilobites. Au Mésozoïque, l'océan a acquis un aspect « moderne », avec des organismes mobiles (mollusques et poissons).

Causes et conséquences des extinctions

**Permien**

- 1 Eponge
- 2 Crinoïde
- 3 Brachiopodes
- 4 Nautiloïdes
- 5 Eponge perlée
- 6 Bryozoaire

- 7. Corail
- 8 Trilobite
- 9 Algue
- 10 Gastéropode
- 11 Poisson (Janessa)
- 12 Poisson (Dorypterus)

Crétacé

- 1 Coelacanthe
- 2 Ammonoïdes
- 3 Bélemnites
- 4 Gastéropodes
- 5 Bivalves
- 6 Oursins
- 7 Crabe
- 8 Algue
- 9 Rudistes
- 10 Poisson (Thrissops)
- 11 Poisson (Davichthys)
- 12 Etoile de mer

en brun : animaux fixés ; en rose : animaux libres

Figure XIV 14 : Les fonds marins au Permien et au Crétacé

b. Les causes possibles de la crise K/T

De très nombreuses causes, souvent fantaisistes, ont été envisagées pour expliquer la crise K/T qui a vu en particulier l'extinction spectaculaire des dinosaures. Pour en rire, on peut citer une explication donnée par les créationnistes. Lors du grand déluge universel, Noé se mit en devoir d'accueillir un couple de chaque espèce animale dans son arche pour la sauver de la noyade. Mais comment y faire entrer les dinosaures géants ? La solution était de mettre à l'abri leurs œufs, dans la cale du navire. Mais lorsque le niveau des eaux baissa, et que l'arche s'échoua sur le Mont Ararat, le choc un peu brutal du fond sur la terre émergée fut fatal aux œufs qui se cassèrent : les dinosaures ont donc disparu de la création...

Depuis la publication d'ALVAREZ et al. en 1980, l'explication catastrophiste par un méga-impact météoritique a connu un regain d'intérêt ; de nouvelles données ont été acquises et il n'est plus possible aujourd'hui de mettre en doute la réalité de cet impact. En revanche, les avis divergent sur la responsabilité de cet impact dans l'extinction en masse de la limite Crétacé/Tertiaire.

Causes et conséquences des extinctions

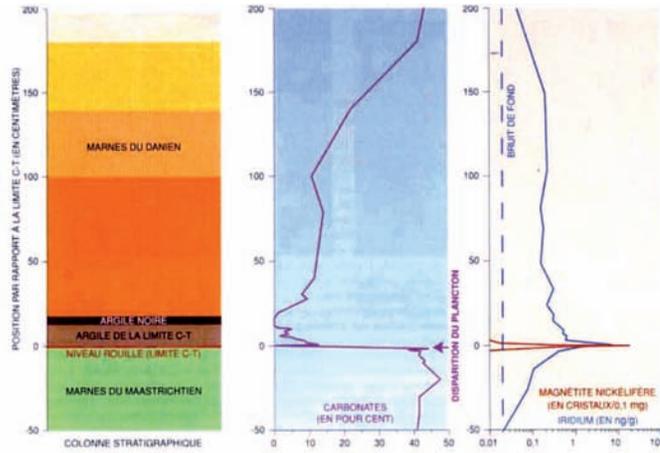


Figure XIV 15 : Les variations géochimiques à la limite K/T

Les faits

- **Géochimie** (Fig. XIV 15). A la limite entre les sédiments crétacés et tertiaires en domaine marin, on enregistre une chute de la proportion de CO_3Ca (attribuable à une baisse de la température de l'eau et à une diminution de la photosynthèse), une baisse du rapport $^{12}C/^{13}C$ (indiquant une réduction de la photosynthèse). Le niveau d'argile noire déposé à cette limite en moins de 1 Ma est concentré en un métal rare dans la croûte terrestre, l'iridium Ir (100 fois plus que la moyenne), et ce dans plus d'une centaine de sites répartis sur toute la surface du globe (Fig. XIV 16), dans des sédiments aussi bien océaniques que continentaux (voir encadré). Dans les calcaires encadrant ce niveau d'argile, la teneur en Ir croît puis décroît rapidement ; la durée estimée de cette anomalie en iridium est de 600 000 ans. Ce niveau de couleur noire contient également du carbone et des hydrocarbures complexes caractéristiques de la suie produite par les feux de forêts.

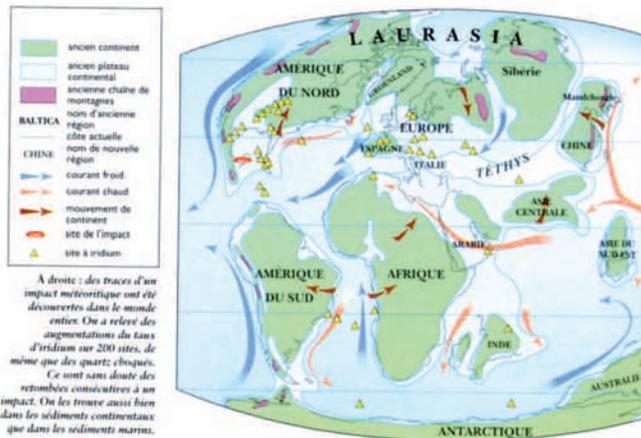


Figure XIV 16 : Les sites à iridium

Causes et conséquences des extinctions

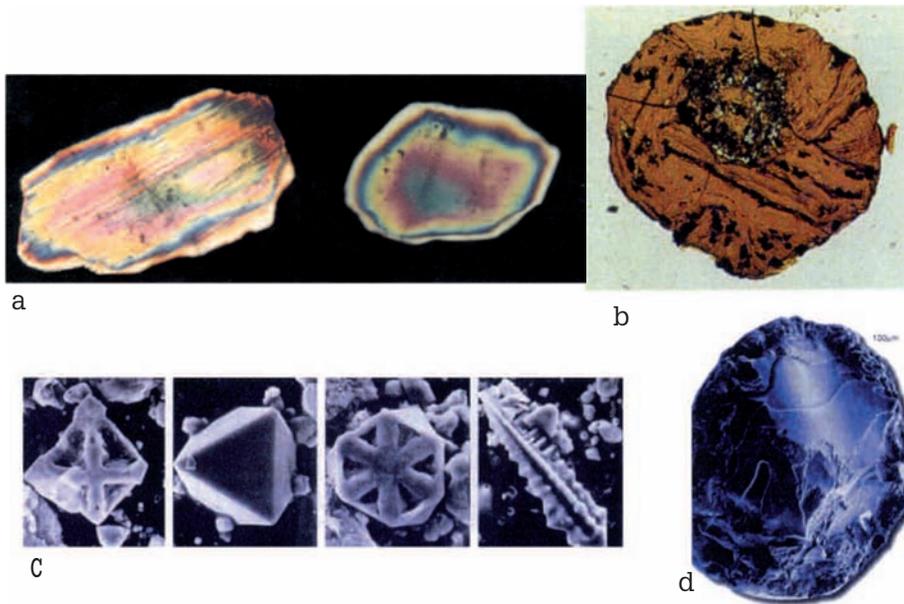


Figure XIV 17 : Particularités minéralogiques à la limite K/T

- a : quartz choqués
 b : sphérule argileuse
 c : cristaux de magnétite nické-
 lifère
 d : sphérule de verre

- **Minéralogie** (Fig. XIV 17). On note dans ce niveau :

- la présence sous le niveau à iridium de quartz à structure lamellaire ou « quartz choqués » qui ne peuvent se former qu'à de très hautes pressions, de silice sous forme de stishovite (forme de haute densité formée à très haute pression). On y trouve aussi des zircons choqués et de minuscules cristaux de diamant, nécessitant eux aussi de très fortes pressions.
- la présence immédiatement sous ce niveau à quartz choqués de sphérules de basalte fondu (verre le plus souvent altéré en sphérules argileuses), analogues aux tectites produites par la fusion des roches sous l'énorme énergie produite par les impacts météoritiques.
- la présence aussi dans la couche à iridium de cristaux de magnétite nické-
lifère, minéral paradoxal puisqu'il ne peut se former qu'à des températures très élevées (régnant en profondeur), mais en présence d'oxygène : on le trouve en particulier dans la croûte de fusion qui se forme autour des météorites lors de leur entrée à grande vitesse dans l'atmosphère terrestre.

- **Géologie** (Fig. XIV 18). On a repéré en 1991 un vaste cratère d'impact (180 à 310 km de diamètre) âgé de 65 Ma dans le golfe du Mexique, centré sur la

Causes et conséquences des extinctions

localité de Chicxulub sur la côte du Yucatan. Ce cratère maintenant recouvert par un millier de mètres de sédiments est invisible en surface, mais se traduit par des anomalies géophysiques circulaires et concentriques ; il avait été reconnu dans les années soixante par des forages pétroliers qui ont remonté des brèches d'impact et des roches fondues au-dessus d'un socle de roches carbonatées. Sur un vaste arc de cercle de 3 000 km de rayon autour du point d'impact, on a trouvé des dépôts détritiques grossiers de type tsunami ; dans les calcaires surmontant l'argile, des traces de dissolution pourraient être dues à l'action de pluies acides.

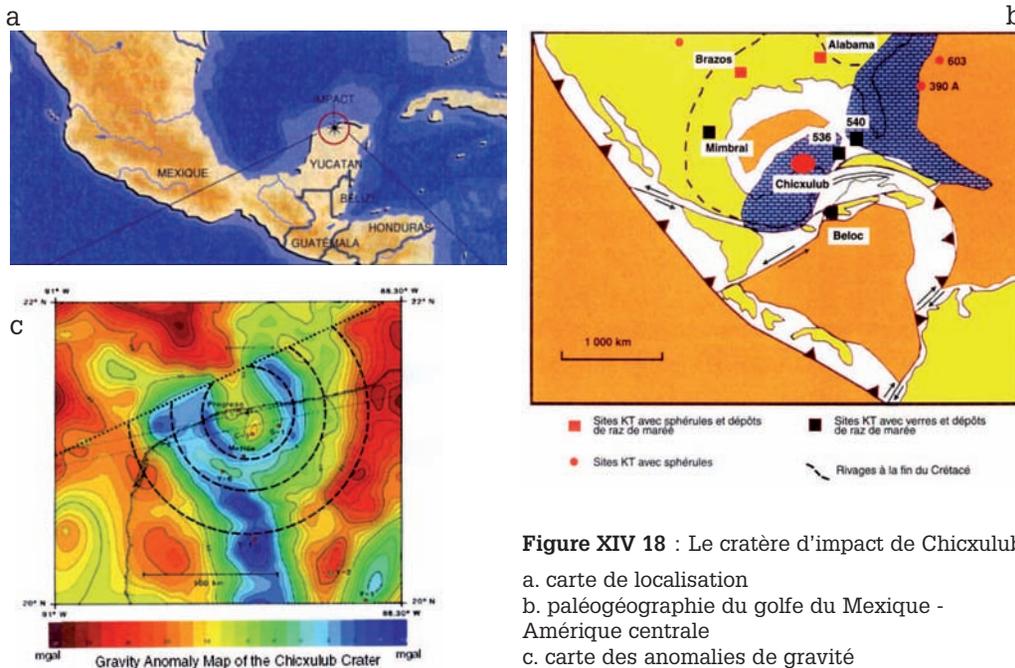


Figure XIV 18 : Le cratère d'impact de Chicxulub

a. carte de localisation

b. paléogéographie du golfe du Mexique - Amérique centrale

c. carte des anomalies de gravité

Remarquons que plusieurs de ces observations peuvent aussi bien être expliquées par l'hypothèse de l'impact cosmique que par celle de la crise volcanique :

- les volcans de type hawaïen émettent des laves provenant du manteau, relativement riches en iridium. Mais les coulées basaltiques du Deccan sont très pauvres en iridium : les éruptions du Deccan n'ont pas pu fournir les énormes quantités de ce métal contenues dans le niveau de la limite K/T. De plus, si on tient compte d'autres métaux platinoïdes associés à l'iridium, comme le palladium et l'osmium, leurs abondances relatives et leurs compositions isotopiques sont comparables à celles que l'on observe dans les météorites, mais pas dans les basaltes.

Causes et conséquences des extinctions

- Les volcans peuvent également émettre des gouttes de verre volcanique comparable à celles des tectites.
- Ils sont également à l'origine d'incendies de forêts, de tsunamis et de pluies acides.
- Les quartz choqués pourraient également de former lors d'explosions volcaniques très violentes (il s'en forme lors des explosions nucléaires souterraines).

Tout récemment, le rôle de cet impact de Chicxulub dans l'extinction de la limite K/T vient d'être fortement mis en doute : d'après des données provenant en particulier d'un nouveau forage, il serait en fait antérieur de 300 000 ans à la limite fatidique (voir encadré). Les fluctuations climatiques de la fin du Crétacé (refroidissement marqué), la baisse du niveau marin puis le réchauffement dû au volcanisme du Deccan suffiraient à expliquer les extinction de la limite K/T. Mais cette interprétation est loin de faire l'unanimité : l'impact de la limite K/T est encore une question très débattue.

Pourquoi l'iridium ?

L'idée de doser la teneur en iridium du niveau d'argile de la limite K/T provient du désir de W. ALVAREZ de mesurer la durée de dépôt de ce niveau. Avec son père L. ALVAREZ, prix Nobel de physique, ils ont l'idée pour mesurer avec précision cette durée, probablement faible et très ancienne, d'utiliser un chronomètre original : le dépôt de matière extra-terrestre provoqué par la pluie régulière de micrométéorites sur la Terre. Ces poussières provenant pour la plupart de la ceinture d'astéroïdes sont en effet relativement riches en éléments chimiques qui sur la Terre sont assez abondants dans le manteau, mais très rares dans la croûte. Il s'agit en particulier des métaux du groupe du platine, parmi lesquels l'Iridium (Ir) est relativement facile à mesurer par la technique de l'activation neutronique, couramment pratiquée au laboratoire de L. ALVAREZ à Berkeley. Cette méthode n'est pas à la portée de la plupart des laboratoires de Sciences de la Terre : elle consiste à bombarder l'échantillon par un flux de neutrons qui rendent l'iridium radioactif, puis à mesurer cette radioactivité induite. Si on peut évaluer le flux de micrométéorites supposé constant, on pourra en déduire le taux de sédimentation, donc le temps écoulé durant le dépôt de la couche d'argile. Les mesures doivent être très précises car les concentrations dans les sédiments sont en général de l'ordre de quelques dixièmes de ppb (parties par milliard), quelques centièmes de ppb en moyenne dans la croûte terrestre, 500 ppb dans certaines météorites. Dans la couche d'argile de la limite K/T et dans les calcaires qui l'encadrent sur quelques cm, elles atteignent 9 ppb : cela correspondrait à plusieurs millions d'années si cet iridium ne provenait que de l'apport des micrométéorites. D'où la conclusion qu'il s'est produit un événement d'origine extra-terrestre bref et

Causes et conséquences des extinctions

exceptionnel, dont le plus probable est un impact météoritique. En faisant l'hypothèse que la couche enrichie en iridium s'étend sur toute la surface de la Terre, elle correspondrait à un apport de 500 000 tonnes d'iridium ; en se fondant sur la teneur en iridium de divers météorites, ALVAREZ et al. ont estimé la taille de l'objet extra-terrestre à 10 km de diamètre, soit une énergie cinétique libérée équivalant à 100 millions de tonnes de TNT et un cratère d'impact de 200 km de diamètre : c'est à peu près la taille du cratère de Chicxulub.

On peut expliquer la durée apparemment assez longue de l'anomalie à iridium (Fig. XIV 19), d'une part par un entraînement de l'iridium vers le bas par les eaux interstitielles dans les sédiments crétacés, postérieurement à son dépôt ; d'autre part par un dépôt tardif dans les premiers sédiments tertiaires (érosion et transport de la matière tombée sur les zones continentales, transit de l'iridium en solution dans l'eau de mer pendant des milliers d'années avant son dépôt).

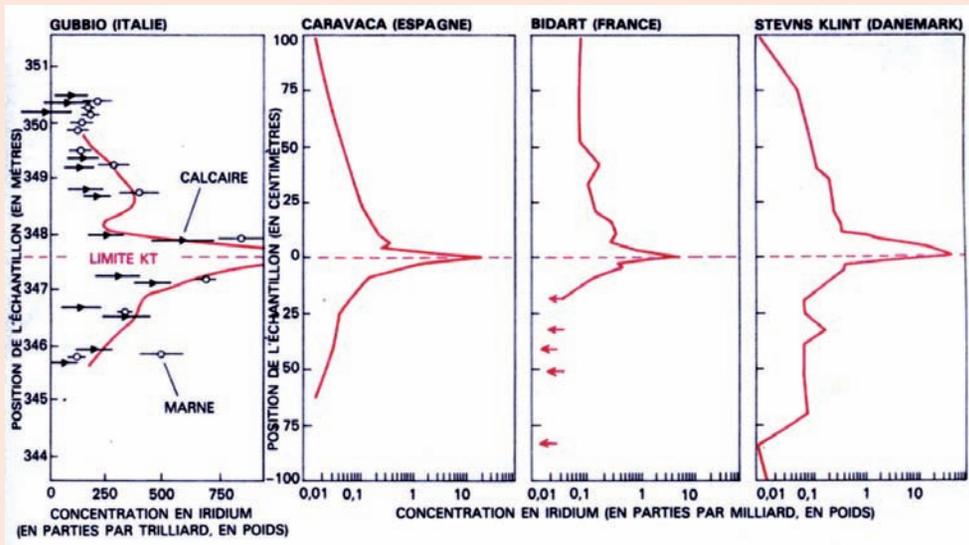


Figure XIV 19 : Etallement du « pic d'iridium » sur plusieurs sites

Un scénario probable (Fig. XIV 20)

Une longue période de volcanisme intense (« catastrophe qui dure ») et/ou une longue période d'impacts nombreux (de l'ordre de 500 000 ans) – à moins qu'il s'agisse d'un impact unique, qui serait équivalent à l'explosion de 100 000 milliards de tonnes de TNT - enrichissent l'atmosphère en aérosols chargés de H_2O , CO_2 , SO_2 et en poussières. Il faut y ajouter les fumées provenant des incendies de forêts

Causes et conséquences des extinctions

généralisés allumés sur une grande partie des terres émergées par les retombées de l'explosion. La très forte nébulosité, l'obscurcissement de l'atmosphère entraînent un hiver long de plusieurs mois avec des températures constamment négatives, d'où une réflexion accrue de la lumière solaire par la neige (albedo de 80%). Puis un réchauffement rapide (de l'ordre de 30°C) par accroissement de l'effet de serre (H₂O et CO₂ atmosphériques) avec un déluge de pluies acides entraîne érosion des sols, défoliation, acidification des eaux marines de surface etc... Il a très bien pu se produire une succession de « froids et chauds » pendant plusieurs centaines de milliers d'années ! Cette crise climatique globale atteint d'abord les végétaux et micro-organismes photosynthétiques. L'arrêt de la photosynthèse, la disparition d'une grande partie de la végétation produit une rupture des chaînes trophiques dans les milieux marins et terrestres entraînant la disparition de nombreuses espèces. En revanche, les espèces se nourrissant de débris organiques ont encore de quoi subsister. La végétation pourra se reformer en quelques centaines ou milliers d'années grâce aux plantes des régions épargnées par l'incendie et aux formes de résistance que possèdent les plantes (spores et graines). Mais la diversité des espèces végétales a notablement diminué : en Amérique du Nord, 51% des espèces d'angiospermes, 36% des gymnospermes et 25% des fougères et apparentés auraient disparu. Ce scénario qui demande à être affiné en tenant compte des espèces qui ont résisté à la crise peut expliquer comment cette crise a pu être sélective.

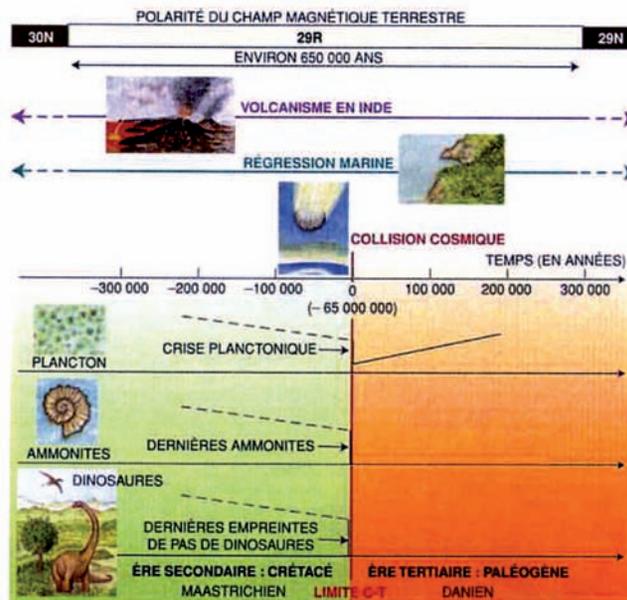


Figure XIV 20 : Les causes multiples de la crise K/T

Causes et conséquences des extinctions

Quelques pistes d'explication de la sélectivité des extinctions (d'après Cyril LANGLOIS et Pierre THOMAS, site Planet-terre)

- Peut-être la petite taille a-t-elle été un avantage : elle suppose des besoins en nourriture plus faibles, un régime alimentaire plus varié que celui des gros herbivores ou des carnivores stricts, une plus grande capacité à se déplacer, à se cacher, etc. Cet atout vaudrait alors pour les amphibiens, les lézards et les serpents.
- Les animaux hétéothermes peuvent rester inactifs et sans nourriture pendant de longues périodes : les crocodiles actuels peuvent stocker d'importantes réserves de graisse dans leur queue, et se passer ainsi de nourriture sur plusieurs semaines, par exemple. Certains amphibiens actuels peuvent passer l'hiver en diminuant énormément leur métabolisme, et même pour certains en se laissant geler. Peut-être les dinosaures n'avaient-ils pas ces capacités, surtout si on les suppose « à sang chaud », ou du moins dotés d'un métabolisme élevé, au moins pour les espèces de taille petite et moyenne.
- Il semble enfin que les tétrapodes d'eau douce (tortues et crocodiles), même de grande taille, ont mieux supporté la crise. C'est aussi vrai pour les poissons d'eau douce, qui ne subissent pas de réel bouleversement au niveau du nombre de familles ou de genres. Cette constatation s'accorde avec l'explication des extinctions par une crise des réseaux alimentaires basés sur la photosynthèse : « l'hiver d'impact » aurait gravement affecté ces réseaux trophiques, et donc les herbivores et les carnivores qui s'en nourrissent. Par contre les réseaux trophiques d'eau douce, plutôt basés sur la consommation de matière organique, dissoute ou en suspension, par les microorganismes puis les petits animaux (larves d'arthropodes, petits poissons...) n'auraient pas été autant touchés.

Causes et conséquences des extinctions

Groupe	Familles présentes	Familles éteintes	Taux d'extinction
Chondrichthyens (Requins & Raies)	44	8	18
Poissons osseux	50	6	12
Amphibiens	11	0	0
Reptiles (6 groupes)	83	45	54
1- Cheloniens (Tortues)	15	4	27
2- Lacertiliens (Lézards et Serpents)	16	1	6
3- Crocodiliens	14	5	36
4- Ptérosauriens (« reptiles volants »)	2	2	100
5- Plésiosauriens (« reptiles marins »)	3	3	100
6- Dinosauriens Dinosauriens sauf Oiseaux	21	21	100
Oiseaux	12	9	75
Mammifères	22	5	23
Groupes « primitifs »	10	1	9
Marsupiaux	4	3	75
Placentaires	7	1	14
Total des Vertébrés	210	64	30
Poissons	94	14	15
Tétrapodes	116	50	43
Amniotes	105	50	48

Tableau 4

Taux d'extinction des vertébrés au Maastrichtien (dernier étage du Crétacé, limite Crétacé/Tertiaire) d'après BENTON M.J., *Vertebrate Paleontology*, Blackwell, 2000.

Causes et conséquences des extinctions

Polémique sur un cratère

D'après Gerta KELLER de l'université de Princeton, l'impact responsable du cratère de Chicxulub n'est en rien responsable de l'extinction de la limite K/T : il lui est antérieur de 300000 ans. Elle apporte divers arguments à l'appui de cette thèse :

- les microtectites sont réparties en deux niveaux séparés par 15 à 20 cm de calcaire gréseux ; dans le NE du Mexique, elle a découvert des couches à microtectites au-dessous de sédiments datés par microfossiles d'environ 300000 ans avant la limite Crétacé-Tertiaire ;
- un nouveau forage de recherche implanté à Yaxcopoil, à environ 60 km du centre du cratère confirme que l'impact a bien précédé l'extinction massive. Au-dessus de 100 m de brèche d'impact (mélange de roches brisées, fondues et de sphérules), on trouve 50 cm de calcaire micritique, puis la couche d'argile de la limite K/T surmontée par les marnes à foraminifères tertiaires. Les calcaires contiennent des foraminifères mal conservés attribués au Crétacé terminal ; ils admettent de fins niveaux d'argile verte glauconieuse, portant des bioturbations. Glauconie et bioturbations indiquent un dépôt lent (plusieurs milliers d'années) en milieu calme, et non un dépôt instantané de tsunami en milieu turbulent.

Elle en conclut que l'impact de Chicxulub ne fut que l'une des catastrophes qui s'abattirent en série sur la Terre vers la fin du Crétacé ; l'extinction en masse coïncidant avec un autre impact bien plus important dont la cratère n'a pas été retrouvé.

Ian SMIT, de l'université libre d'Amsterdam, qui a étudié les échantillons provenant du même forage, réfute point par point les arguments de G. KELLER et arrive à des conclusions opposées.

- Au-dessus de la brèche d'impact, on trouve 70 cm de grès essentiellement dolomitique (et non des calcaires micritiques), puis une couche d'argile sans iridium qui ne correspond pas à la limite Crétacé-Tertiaire : une partie de la séquence sédimentaire manque.
- Les grès ne contiennent pas de microfaune : ce sont en fait des cristaux de dolomite dont les angles ressemblent à des loges de foraminifères planctoniques.
- Les niveaux d'argile verte ne contiennent pas de glauconie, mais proviennent de tectites altérées.
- Les bioturbations n'existent que dans la partie supérieure de la couche ; elles ont été créées après son dépôt.

Causes et conséquences des extinctions

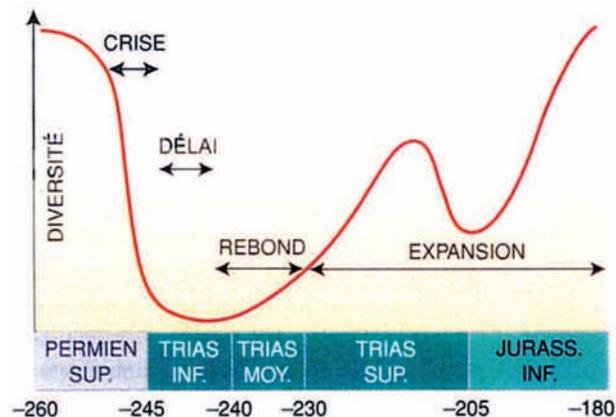
Cette couche de grès correspond donc bien à un dépôt de tsunami ; l'impact de Chicxulub n'est pas antérieur à la limite Crétacé-Tertiaire.

Cette polémique montre que même un forage ne résout pas forcément un problème géologique, et surtout qu'à partir des mêmes échantillons deux chercheurs différents peuvent aboutir à des conclusions opposées.

14. 5 Rôle des crises : les extinctions créatrices

L'observation des archives fossiles montre que :

- après chaque période de crise majeure, après l'appauvrissement de la biodiversité, c'est de façon générale une faune nouvelle qui se met en place et assure le renouvellement et le retour à la diversité biologique, donc l'évolution de la vie. C'est particulièrement net après la grave crise de la limite P/T : sur une Terre devenue presque vide, la diversification des groupes survivants est rapide, permettant la reconquête de toutes les biotopes libérés par l'extinction de masse. (Fig. XIV 21)



APRÈS LA CRISE DE LA FIN DU PERMIEN, la reconquête est longuement différée (délai au Trias inférieur) avant le rebond ; ce dernier est marqué notamment par la réapparition de « taxons Lazare ». Au Trias supérieur, de nouvelles diversifications ont précédé une autre crise, survenue à la fin de cette période.

Figure XIV 21 : La « reconquête » après la crise P/T

Causes et conséquences des extinctions

Pendant la crise, les différents groupes ne réagissent, pas de la même façon. On peut distinguer (Fig. XIV 22) :

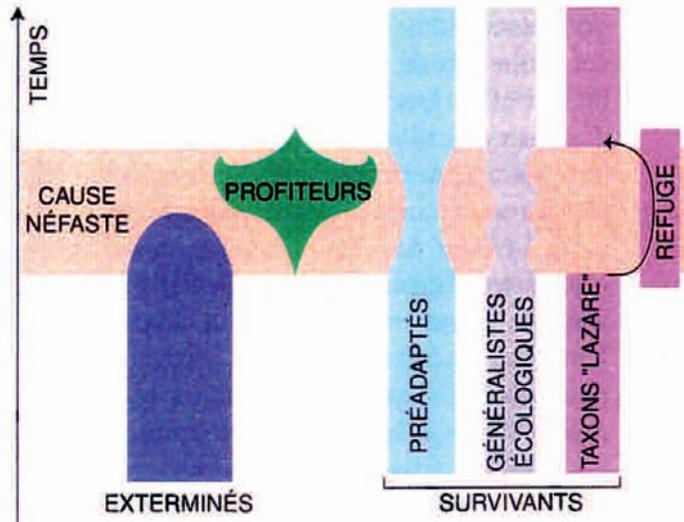


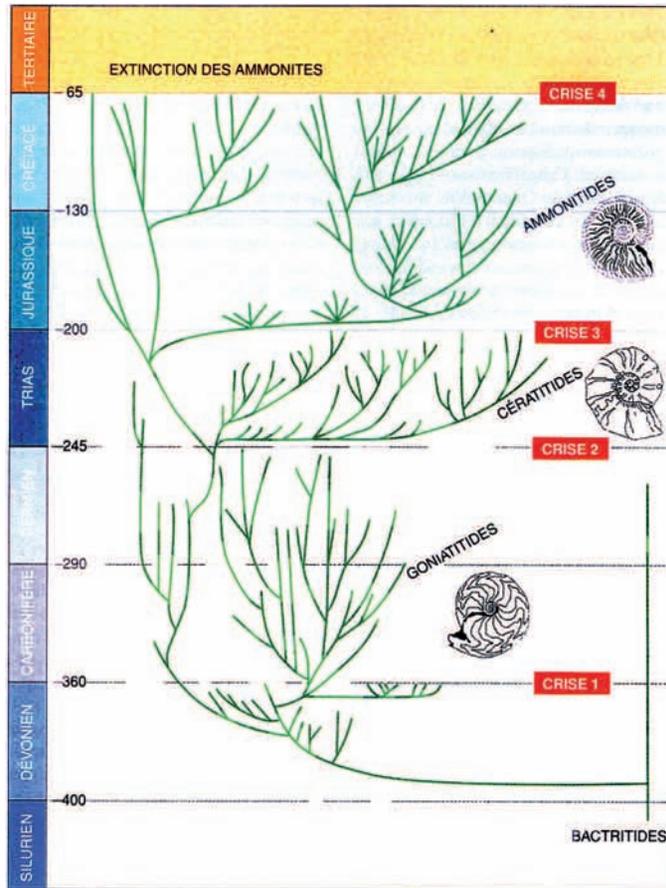
Figure XIV 22 : Comportements des organismes lors d'une crise

- Les groupes exterminés, dont toutes les espèces sont éliminées lors de la crise : ils disparaissent définitivement de l'arbre du vivant.
- Les groupes « profiteurs », qui se développent avec une faible diversité mais un grand nombre d'espèces. C'est le cas par exemple des dinoflagellés pendant la crise K/T.
- Les groupes « survivants » comportent des préadaptés (homéothermie des mammifères, plantes possédant des formes de résistance) et des généralistes écologiques peu spécialisés, très adaptables et cosmopolites, tolérant bien les changements de l'environnement.
- Les groupes « opportunistes », lignées restées jusque là discrètes qui se diversifient en profitant des niches écologiques libérées (augmentation de l'espace disponible).
- Les « taxons Lazare » semblent ressusciter après une disparition passagère pendant la crise. Une partie de leur population (relique) a pu subsister dans un milieu refuge, et assure le repeuplement après la crise.

Causes et conséquences des extinctions

Quelques exemples :

- 1. Evolution des ammonoïdés qui ont survécu à plusieurs extinctions de masse grâce à quelques taxons survivants, avant de disparaître définitivement lors de la crise K/T (Fig. XIV.23)



IMPACT DES DIVERSES CRISES sur le parcours évolutif des ammonoïdés depuis leur origine au Dévonien inférieur, enracinée chez les bactritides, jusqu'à l'extinction définitive des ammonites lors de la crise fini-crétacée. Aux extinctions d'espèces succèdent des radiations de nouvelles espèces, à partir des quelques branches restantes (d'après Tintant, 1985, modifié).

Figure XIV 23 : Evolution des ammonoïdés

Causes et conséquences des extinctions

- 2. Remplacement des brachiopodes par les mollusques lamellibranches à la limite P/T (Fig. XIV 24). Les deux groupes sont affectés par la crise, mais la variété des lamellibranches s'élève rapidement au Trias.

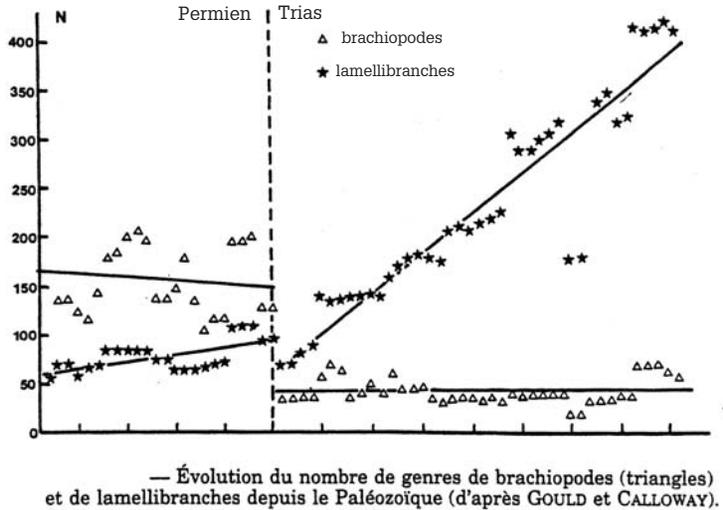


Figure XIV 24 : Le remplacement partiel des brachiopodes par des lamellibranches à la limite P/T

- 3. Remplacement des placodermes, très florissants et actifs, par les actinoptérygiens à la limite Dévonien – Carbonifère.
- 4. Remplacement des grands reptiles par les mammifères à la limite K/T, non par concurrence, mais par occupation des niches libérées par la disparition des dinosaures. La régulation thermique et la molaire tribosphénique (coupante et broyeuse) sont les principaux atouts qui permettent l'expansion des mammifères.
- 5. La « grande coupure », cas d'extinctions par suite de luttes entre espèces autochtones et immigrantes.

En tout cas, les extinctions de masse qui sont intervenues dans l'histoire de la vie sont un aspect de la contingence qui caractérise cette histoire. Citons S.J. GOULD : « L'histoire de la vie : une série imprédictible d'étapes largement fortuites, susceptibles au plus haut point d'être interrompues, série qui décrit une trajectoire extrêmement contingente. Les espèces qui s'épanouissent sont des îlots de stabilité temporaire, et non pas des entités subissant continuellement un processus d'amélioration. » (GOULD, les quatre antilopes de l'Apocalypse).

Une évolution sans extinctions verrait un accroissement exponentiel de la biodiversité, arrivant à une saturation : tous les biotopes étant occupés, la spéciation ne pourrait plus se produire, faute de place pour de nouvelles espèces

Causes et conséquences des extinctions

(Fig. XIV 25). La sélection naturelle continuerait à perfectionner les espèces existantes, créant des organismes peut-être plus performants que ceux qui existent aujourd'hui. Mais la biodiversité serait probablement moindre.

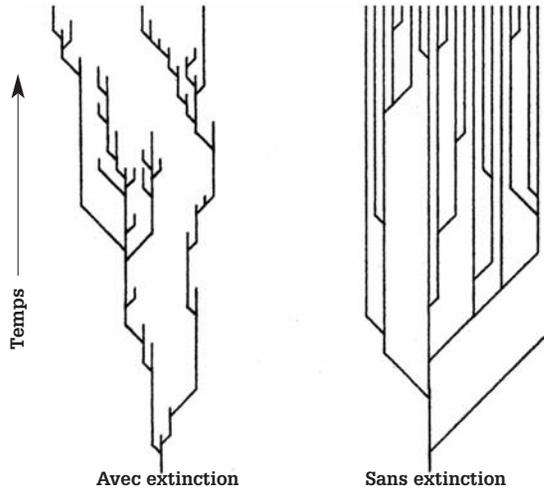


Figure XIV 25 : Deux arbres évolutifs théoriques avec et sans extinction

L'extinction élimine des lignées prometteuses, de façon aléatoire et imprédictible ; mais cela ménage des espaces permettant l'apparition d'innovations évolutives. L'extinction fournit en permanence de nouvelles occasions à des organismes inédits d'explorer de nouveaux habitats et d'expérimenter des modes de vie originaux. Peut-être est-ce nécessaire à l'apparition de la variété des formes vivantes observées, de nos jours comme dans le passé. La prise en compte des extinctions de masse a en tout cas conduit à revoir l'arbre évolutif du vivant (Fig. XIV 26) : à la vision d'une diversité croissante s'est substituée celles d'une diversité " en broussailles", maximale après l'explosion du Cambrien et fortement réduite par chaque crise.

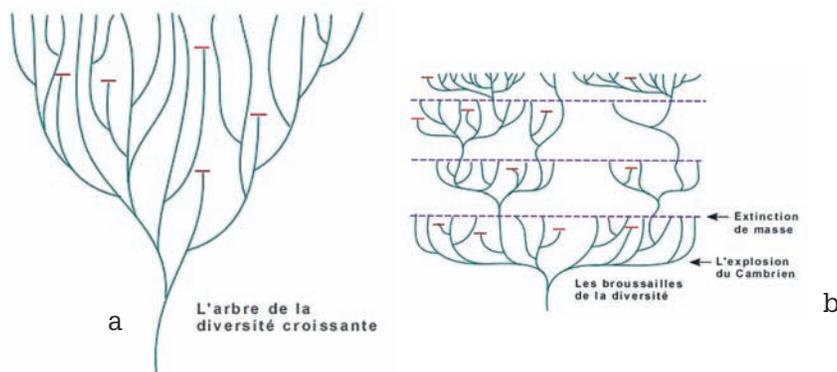


Figure XIV 26 : Deux arbres évolutifs du vivant : a. Diversité croissante
b. Réductions de la diversité par les extinctions