Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 126 (2003)

Artikel: Evolution de la biosphère et extinctions en masse, conjonctions des causes : exemple de la limite Crétace-Tertiaire (KT)

Autor: Adatte, Thierry

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89583

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

EVOLUTION DE LA BIOSPHÈRE ET EXTINCTIONS EN MASSE, CONJONCTIONS DES CAUSES: EXEMPLE DE LA LIMITE CRÉTACÉ-TERTIAIRE (KT)

THIERRY ADATTE

Institut de Géologie de l'Université, Emile Argand 11, 2000 Neuchâtel, Suisse

Mots-clés: Extinction en masse, limite Crétacé-Tertiaire, impacts multiples, volcanisme, eustatisme, climat, Mexique, causes multiples, gradualisme.

Key-words: Mass Extinction, Cretaceous-Tertiary, Mexico, multi-impacts, volcanism, climatic and eustatic fluctuations, multicausal scenario.

Résumé

L'évolution du monde vivant est entrecoupée de crises profondes où la diversité spécifique a diminué d'une manière dramatique. Les plus importantes parmi ces crises sont celle de la fin du Crétacé, il y a 65 Ma, populaire parce qu'elle correspond à la disparition des Dinosaures, et celle de la fin du Permien, il y a 250 Ma, où 90% du benthos marin ont disparu en très peu de temps. Le présent article tente de préciser et d'évaluer les facteurs ayant abouti à la crise biologique majeure de la limite Crétacé-Tertiaire. Les données paléontologiques, paléoclimatiques et paléoécologiques indiquent que l'extinction en masse caractérisant la limite KT (65 Ma) est, en fait, plus progressive qu'abrupte, débutant au moins 500'000 ans avant la limite KT. En tenant compte de toutes ces données, on constate donc que trois causes principales ont agi de concert à des degrés divers dans cette extinction massive du KT: intensification de l'activité volcanique (Traps du Deccan), fluctuations climatiques et du niveau de la mer impliquant une détérioration graduelle de l'environnement bien avant la limite KT, entraînant un déclin sélectif et graduel accéléré probablement par plusieurs impacts d'astéroïde prédatant mais aussi coïncidant avec la limite Crétacé-Tertiaire. Il devient en effet, de plus en plus évident que le fameux cratère d'impact découvert dans le Yucatan prédate la limite KT et sa couche enrichie en iridium, de plusieurs centaines de milliers d'années. L'extinction en masse de la limite Crétacé-Tertiaire (KT) montre que le cumul à long terme de conditions de stress (fluctuations climatiques, du niveau marin, volcanisme) conduit à un changement graduel de la diversité des espèces. Par contre, les changements rapides comme les impacts de la limite KT induisent des extinctions en masse soudaines (cas des foraminifères planctiques à la limite KT). Les extinctions en masse de la limite KT résultent donc d'une addition d'événements défavorables de longue et de courte durée.

Abstract

Mass extinctions events occur in Earth history when environmental stresses exceed tolerance limits for organisms and consequently lead to their extinction. The magnitude of the extinction depends on the kind of stress, various environmental factors and the tempo at which stress is imposed, the latter determines whether a mass extinction is gradual or sudden. A multiproxies study is therefore of great interest for a better understanding of the causes which led to a mass-extinction. Paleontologic, climatic and ecologic data reviewed here thus provide strong evidence for a progressive, rather than sudden, mass extinction pattern that began during the last 500 k.y. of the Cretaceous and culminated at the KT boundary. No single kill mechanism can be identified for this extinction pattern. Evidence for a likely multi-event killing mechanism includes a series of rapid and extreme climate fluctuations associated with sea-level changes, a period of major volcanic activity prior and across the KT boundary and asteroid or comet impacts (comet showers). Thus, the mass extinction resulted from an addition of unfavourable conditions which includes long term perturbations (e.g. Deccan Traps volcanism, cooling, sea-level fluctuations) and short term event asteroid impacts, giving the final stroke to an already stressed biosphere.

The stratigraphy and age of altered impact glass (microtektites, microkrystites) ejecta layers from the Chicxulub crater are documented in late Maastrichtian and early Danian sediments in Mexico, Guatemala, Belize and Haiti. In northeastern Mexico two to four ejecta layers are present in zone CF1, which spans the last 300 k.y. of the Maastrichtian. The oldest ejecta layer is dated at 65.27±0.03 Ma based on sediment accumulation rates and extrapolated magnetostratigraphy. Since the early 1990s the Chicxulub crater on Yucatan, Mexico, has been hailed as the smoking gun that proves the hypothesis that a large meteorite killed the dinosaurs and caused the mass extinction of many other organisms at the Cretaceous-Tertiary (KT) boundary 65 my ago. Here we report evidence from a new core, Yaxcopoil-1, drilled within the transient cavity of the Chicxulub crater that this impact predates the KT boundary by about 300 ky and did not cause the mass extinction of the dinosaurs and many other groups as commonly believed. The evidence was obtained from Yaxcopoil-1 based on five independent proxies, each with characteristic signals across the KT transition supporting a pre-KT age: lithology, biostratigraphy, magnetostratigraphy, stable isotopes and iridium. A multi-impact scenario is most consistent with the impact ejecta evidence. The first impact is associated with major Deccan volcanism and likely contributed to the rapid global warming between 65.4-65.2 Ma, decrease in primary productivity and onset of terminal decline in planktic foraminiferal populations. The K/T boundary impact marks a major drop in primary productivity and the extinction of all tropical and subtropical species. The early Danian impact may have contributed to the delayed recovery in productivity and evolutionary diversity.

INTRODUCTION

L'évolution du monde vivant est souvent perçue comme un processus de diversification conduisant à une augmentation constante du nombre des espèces. Mais le bilan global nous montre que le nombre d'embranchements et d'ordres n'a guère augmenté depuis la dernière grande expansion de la Vie sur notre planète, depuis la conquête des milieux terrestres, il y a un peu plus de 400 millions d'années (Ma). Il est vrai que la prolifération d'espèces nouvelles n'a pas cessé pour autant, mais les nouveaux venus n'ont fait que prendre la place de prédécesseurs disparus.

En regardant de plus près, on s'aperçoit cependant que ce processus de remplacement d'anciennes espèces par de nouvelles formes n'était point régulier (fig. 1). L'évolution du monde vivant est entrecoupée de crises profondes où la diversité a diminué d'une

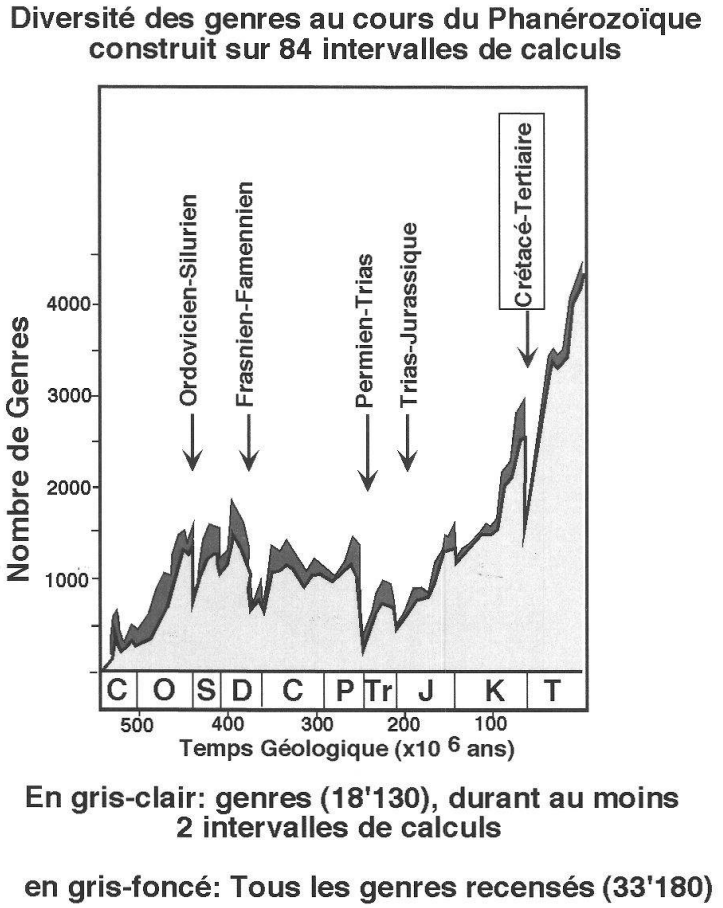


Figure 1:
Diversité des genres d'animaux marins au cours du Phanéroizoïque (-540 Ma-Actuel). Cinq crises majeures sont mises en évidence (selon SEPKOSKI, *in:* WALLISER O.H., 1996, modifié). C: Cambrien; O: Ordovicien; S: Silurien; D: Dévonien; C: Carbonifère; P: Permien; T: Trias; J: Jurassique; K: Crétacé; T: Tertiaire.

manière dramatique (SEPKOSKI, 1994, *in:* WALLISER, 1996). Les plus importantes parmi ces crises sont celle de la fin du Crétacé, il y a 65 Ma, populaire parce qu'elle correspond à la disparition des Dinosaures, et celle de la fin du Permien, il y a 250 Ma, où 90% du benthos marin ont disparu en très peu de temps (notion relative qui reste à préciser). Ces crises ont d'ailleurs été utilisées par les stratigraphes pour diviser le Phanérozoïque, les dernières 550 Ma de l'histoire de la Terre, en trois ères, nommées Paléozoïque (Primaire), Mésozoïque (Secondaire) et Cénozoïque (Tertiaire et Quaternaire). La courbe de diversité des genres marins (fig. 1) laisse apparaître cinq crises majeures: (1) La crise de l'Ordovicien-Silurien (435-445 Ma) avec l'élimination de 20-26 % des familles, 50-60% des genres et 85% des espèces (le milieu récifal est particulièrement décimé).(2) La crise du Dévonien Supérieur (Frasnien-Famménien, 365 Ma) caractérisée par la disparition de 20-22% des familles, 47-57% des genres et 70-80% des espèces (le milieu récifal est exterminé). (3) La grande crise du Permien-Trias (251 Ma) pendant laquelle 50-57% des familles, 70-83% des genres et 85-96% des espèces sont exterminées, touchant plus particulièrement le benthos (trilobites, coraux, fusulines et brachiopodes). (4) La crise Trias-Jurassique (203 Ma) qui voit la disparition de 22-23% des familles, 40-53% des genres, 76% des espèces (conodontes, placodontes, gastéropodes, milieu récifal). (5) La crise Crétacé-Tertiaire (65 Ma) caractérisée par l'élimination de 15-16% des familles, 40-50% des genre, 76% des espèces (ammonites, bélemnites, rudistes, inocérames, dinosaures,

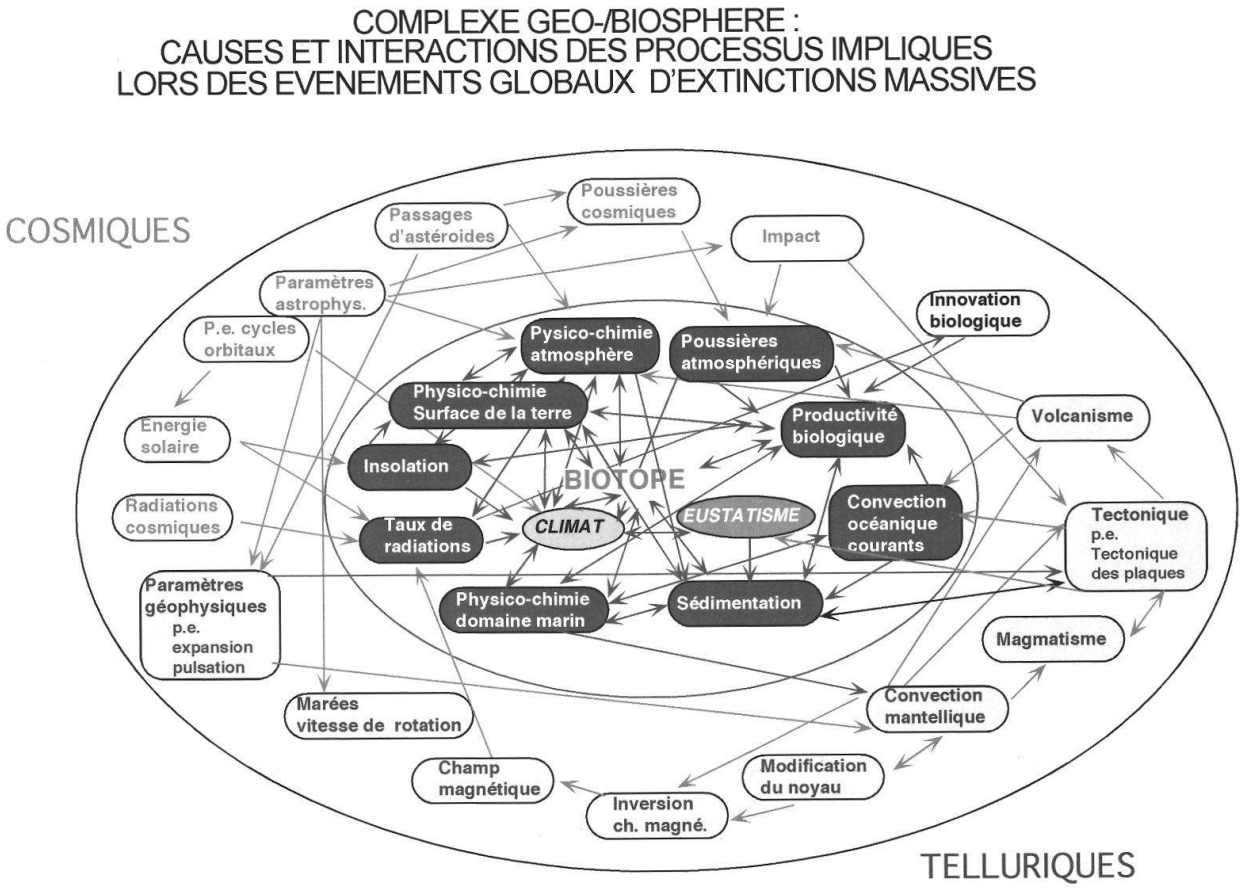


Figure 2: Causes et interactions des processus impliqués lors des événements d'extinction massive. Ces processus d'ordre cosmique, extraterrestre, et d'ordre tellurique, lié à la dynamique terrestre (tiré de WALLISER, 1996, modifié).

plancton calcaire affecté). A ces 5 crises majeures, il faut ajouter des crises intermédiaires et mineures qui coïncident souvent avec des limites d'étages ou de sous-étages.

L'évolution de la biosphère est donc entrecoupée de crises biologiques causées par des changements bouleversant l'ensemble des milieux écologiques de la terre dont les facteurs ont essentiellement deux origines: (i) extraterrestres, cosmiques (ii) telluriques, propres à l'activité de notre planète telles que fluctuations climatiques, eustatiques ou volcaniques (fig. 2).

Impacts de météorite

L'idée de catastrophes globales a toujours eu une attractivité particulière pour l'esprit humain, depuis le récit biblique du déluge et peut-être depuis bien plus longtemps encore. Il est d'ailleurs intéressant de noter qu'au siècle passé, les opposants les plus fervents à la théorie d'une transformation évolutive des organismes étaient des "catastrophistes", comme le grand Cuvier - et Agassiz! L'on comprend alors l'enthousiasme avec lequel l'hypothèse qu'un impact météorique géant aurait déclenché la crise à la limite Crétacé-Tertiaire fut accueillie. L'effet dévastateur d'un astéroide de 10 km de diamètre est considérable puisque l'énergie libérée lors de la collision équivaut à 10'000 fois celles de toutes les bombes nucléaires disponibles actuellement (LETHIERS, 1998) entraînant des

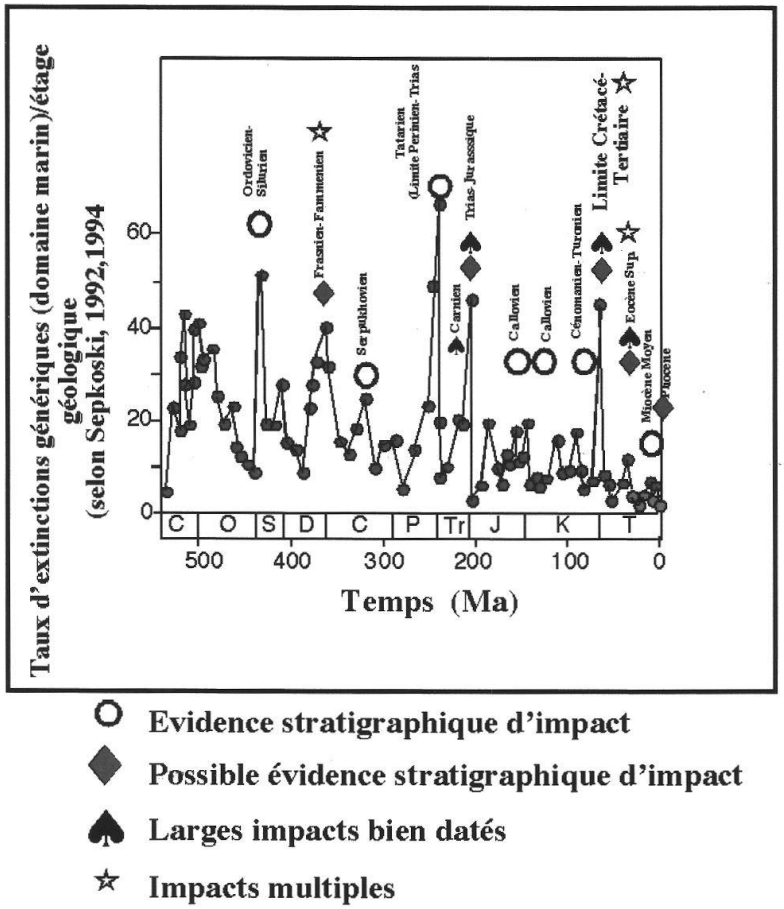


Figure 3:
Taux d'extinctions des genres d'animaux marins par étage géologique (ou sous-étage) durant le Phanérozoïque (-540 Ma-Actuel). Seules 3 extinctions coïncideraient avec des structures d'impacts bien datées (tiré de RAMPINO & HAGGERTY, 1996, modifié).

phénomènes de fusion, vaporisation et d'incendies sur de très vastes étendues. La vaporisation des roches formerait alors un nuage de particules dans l'atmosphère, stoppant les rayons solaires, installant un hiver d'impact et perturbant les chaînes alimentaires en réduisant la photosynthèse. Dans un tel scénario les espèces des hautes latitudes et des grands fonds, plus tolérantes vis à vis des modifications environnementales, seront logiquement moins affectées que celles des zones tropicales qui nécessitent de la chaleur et de la lumière. Certains chercheurs ont d'ailleurs tenté de relier toutes les extinctions en masse avec des évènements d'impacts (fig. 3). Force est de constater que cette corrélation ne tient pas réellement la route. Seuls 4 impacts bien datés coïncident avec des limites d'extinctions (RAMPINO & HAGGERTY, 1996), dont 2 (Trias-Jurassique et Crétacé-Tertiaire) sont des événements majeurs; les 2 autres étant liés à des extinctions mineures (Carnien et Eocène Supérieur). La coïncidence des autres crises majeures avec des impacts restent peu claires.

Volcanisme

Il existe, par contre, une excellente corrélation entre l'âge des grands épanchements volcaniques et l'âge des extinctions. COURTILLOT (1999) montre de manière très convaincante, que 10 des 12 principaux épanchements volcaniques coïncident avec des limites d'extinctions (fig. 4). La corrélation semble presque parfaite, seules 2 provinces basaltiques ne semblent pas être liées avec une extinction (Columbia, USA et Karoo, Afrique du Sud). L'extinction en masse du Permien-Trias, la plus grande de toute l'histoire du

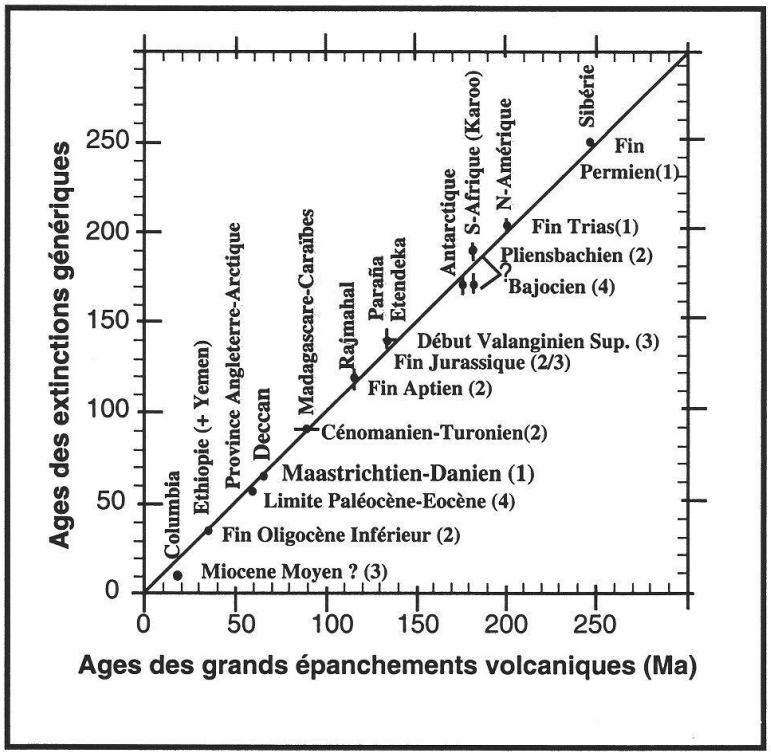


Figure 4:
Comparaison des âges des principaux épanchements basaltiques (datations radiométriques K-Ar ou Ar-Ar) avec les âges des extinctions massives. Les barres d'erreur ont été figurées lorsque celles-ci sont plus grande que les points. Toutes sauf 2 montrent une excellente corrélation, les provinces basaltiques de Columbia et du Karoo ne coïncidant apparemment pas avec une extinction massive. Les chiffres figurant entre parenthèses donnent une idée de la magnitude de l'extinction (tiré de COURTILLOT, 1999).

Phanérozoïque coïncide avec l'activité des Traps (plateaux basaltiques) de Sibérie de même que celle, très médiatique, de la limite Crétacé-Tertiaire, avec la mise en place des Traps du Deccan en Inde. Dans les deux cas, il s'agit d'un volcanisme fissural aérien, dont les poussières et les gaz directement émis dans l'atmosphère ont dû avoir, à court terme, des effets dévastateurs, assez comparables à ceux invoqués dans le scénario "impactiste" (obscurcissement, refroidissement). Une différence importante réside toutefois dans la quantité énorme de CO_2 rejetée dans l'atmosphère induisant à long terme un effet de serre et donc un réchauffement important.

Eustatisme

Les fluctuations les plus significatives du niveau de la mer qui sont intimement liées à la tectonique globale de la terre ont également joué un rôle important dans ces crises biologiques (fig. 5). Son influence est peut- être surestimée. L'estimation de la magnitude de ces extinctions est, en effet, surtout basée sur le registre fossile marin qui est bien moins fragmenté que dans le domaine continental où la préservation des fossiles est aléatoire, rendant ainsi son enregistrement discontinu et morcelé. Néanmoins, l'extinction en masse du Permien-Trias coïncide avec la fin d'un grand cycle régressif (= baisse du niveau marin) de premier ordre (chute du niveau de la mer) et le début d'une phase transgressive (= hausse du niveau marin). Cette fluctuation d'ordre tectono-eustatique (changement de volume des dorsales océaniques) fut problablement un des moteurs de la crise P-T, avec les émissions volcaniques des Traps de Sibérie (fig. 5). Les extinctions majeures et intermédiaires coïncident souvent avec les variations du niveau de la mer qui vont essentiellement affecter la faune benthique et nectonique. Par exemple, les relais évolutifs des

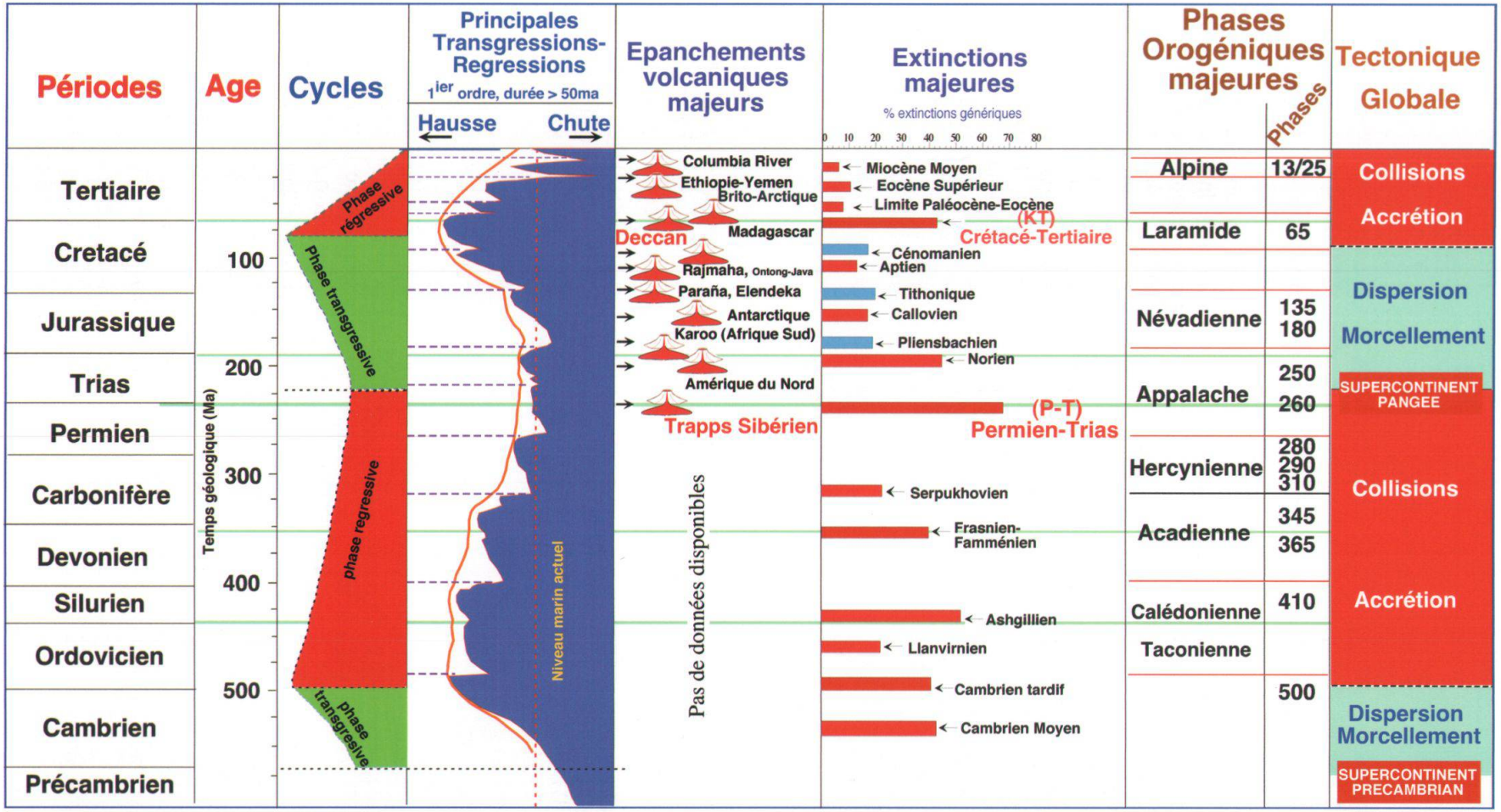


Figure. 5: Variations eustatiques au cours du Phanérozoïque, principaux épanchements basaltiques et phases orogéniques majeures comparées avec les extinctions les plus importantes. Présence de deux cycles de premier ordre, limité par la limite P/T, ainsi qu'une vingtaine de cycles de deuxième ordre d'une durée de 5 à 50 Ma. La grande extinction du Permien-Trias coïncide avec la grande régression entre les 2 cycles de premier ordre et la mise en place des Traps de Sibérie. Les 4 extinctions majeures et plusieurs extinctions intermédiaires correspondent à des cycles régression-transgression de deuxième ordre.

ammonoidés sont situés au Dévonien Supérieur et aux limites Permien-Trias, Trias-Jurassique et Jurassique-Crétacé (HALLAM, 1989) caractérisées par des fluctuations importantes du niveau de la mer.

En résumé, on peut dire que suivant le stade évolutif dans lequel se trouve le monde vivant à un moment donné, il est moins, ou au contraire plus vulnérable. Mais il est aussi évident que chaque crise majeure doit avoir une cause extérieure, quelque chose qui a déclenché la débâcle, que ce soit la chute soudaine d'une grande météorite, évènement instantané, ou simplement une lente et sérieuse détérioration du climat. Si l'on veut se rendre compte des mécanismes qui sont à l'origine d'une crise biologique majeure, il faut évidemment d'abord préciser ce que l'on veut entendre par "instantané". A l'échelle des temps géologiques, un processus d'une durée de 20.000 à 50.000 ans peut être considéré comme un évènement instantané, entre autres parce qu'il est impossible d'arriver à des datations plus précises, même dans les meilleures conditions. Si, par contre, la durée de la crise biologique dépasse le million d'années, il faut plutôt postuler un développement progressif de facteurs défavorables qu'un évènement unique créant une catastrophe d'ampleur mondiale. Ce sont ces alternatives qui seront surtout examinées ici, en prenant l'exemple très médiatique de la limite Crétacé-Tertiaire que le grand public assimile généralement à l'extinction des dinosaures.

Ajoutons ici que la plupart des données, résultats et interprétations qui vont suivre sont le fruit d'une étroite collaboration de plus de 10 ans, entre l'auteur de cet article et G. Keller (Université de Princeton, USA), W. Stinnesbeck, U. Kramar, Z. Berner et D. Stüben (Université de Karlsruhe, Allemagne), A. Pardo (Université de Saragosse, Espagne), Lopez Oliva (Université du Nuevo Leon, Mexique).

CAUSES ET MODALITÉS DE L'EXTINCTION CRÉTACÉ-TERTIAIRE (KT)

Il est connu depuis longtemps, qu'à la fin de l'ère secondaire (Crétacé), il y a 65 millions d'années, la faune et la flore ont subi de profondes modifications. Les micropaléontologues ont par exemple, montré qu'un grand nombre d'espèces planctoniques s'éteignent en peu de temps. Cette diminution du plancton se traduit par une chute brutale de la teneur en carbonates et la présence d'une couche argileuse presque totalement dépourvue de microfossiles (fig. 6). Ce phénomène a été observé aussi bien en Europe, qu'en Afrique, Amérique et dans les océans Atlantique et Pacifique. Sur le terrain, la reconnaissance précise de la limite KT s'avère capitale afin de décrypter l'évolution des organismes et les événements géologiques au passage de l'ère secondaire à l'ère tertiaire. Des coupes géologiques, montrant en continu ce passage, permettent de fixer et de définir la coupure. Parmi les sites les plus connus que notre groupe a pu étudier, on peut citer (fig. 7): le stratotype d' El Kef, Elles, Seldja, Tunisie, Nye Klov et Stevens Klint, Danemark, Gubbio (Italie), Agost et Zumaya (Espagne), Koshak (Mangyshlak, Kazakhstan), la rivière Brazos (Texas), El Mimbral, Loma Cerca (NE Mexique), Albion Island (Belize), El Caribe (Guatemala), Beloc (Haïti), Guayaquil (Equateur), la carrière Poty près de Récife (Brésil), l'île de Seymour (Antarctique), de nombreux sondages dans les océans, dans le Golfe du Mexique et la Mer des Caraïbes (ADATTE *et al*, 2002, KELLER & MACLEOD, 1995, KELLER & STINNESBECK, 1996, KELLER *et al.*, 2003, PARDO *et al.*, 1998...etc.). Ainsi, le passage KT peut s'étudier sous toutes les paléolatitudes et à toutes les paléoprofondeurs de dépôt. Ce dernier fait est très important car l'intensité des extinctions lors de l'événement KT a été très surestimée, puisque bon nombre de coupes géolo-

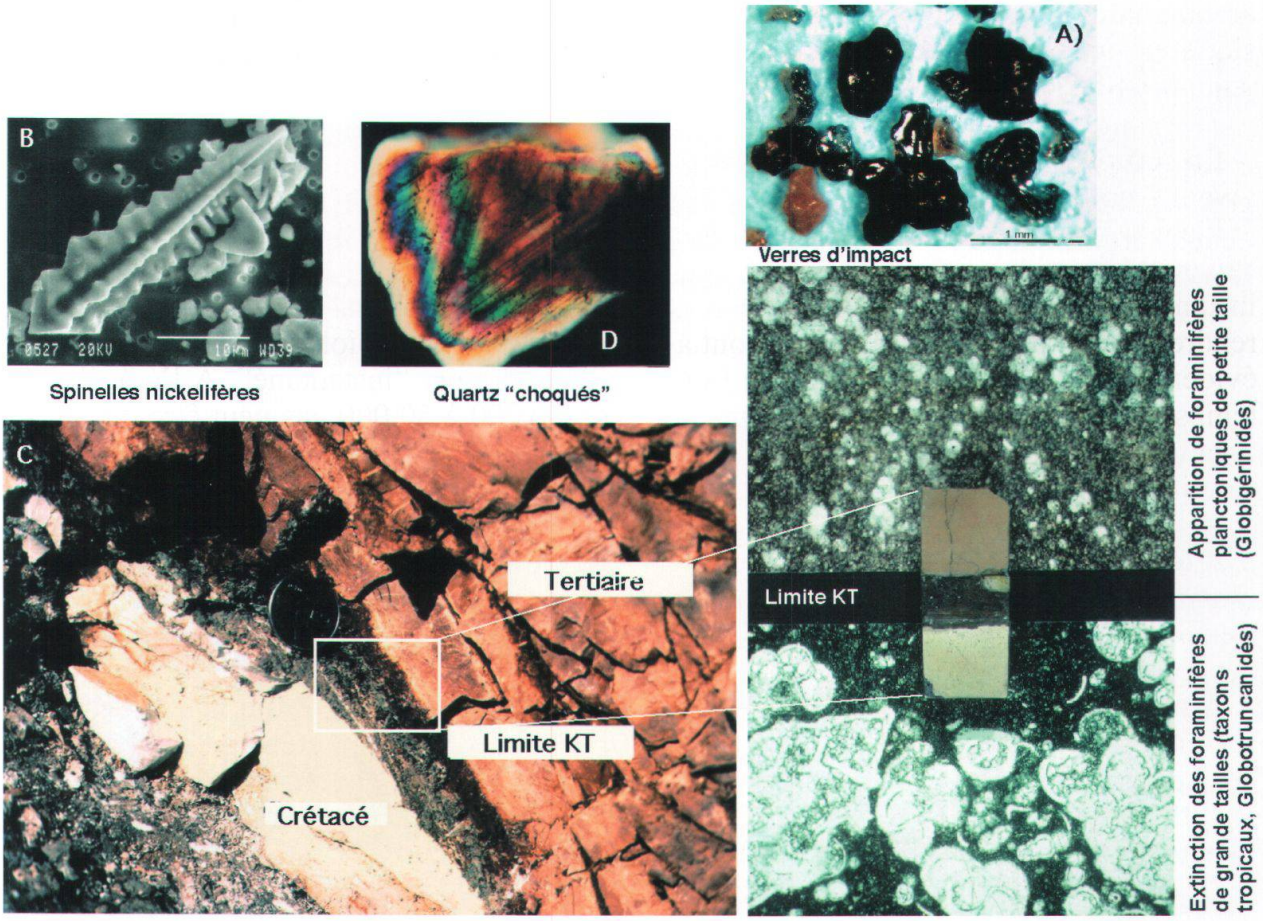


Figure 6: La limite Crétacé-Tertiaire à Gubbio, Italie (C) et ses marqueurs d'origines cosmiques; Présence d'un niveau argileux millimétrique enrichi en iridium, Spinelles nickelifères (B); quartz présentant des lamelles de déformation impliquant une pression de plusieurs gigapascals (D); Les verres d'impacts (microtectites) n'ont pas été identifiés à Gubbio, mais sont présents dans de nombreuses coupes mexicaines et américaines (A). Dans les séries pélagiques de Gubbio, la limite KT montre l'extinction totale des grands foraminifères planctoniques tropicaux (Globotruncanidés) remplacés par de petites formes lisses et cosmopolites (Globigérines).

giques, incluant la limite KT, présentent plusieurs lacunes donnant l'illusion d'un changement rapide. Ces lacunes sont liées à une chute globale du niveau marin enregistrés dans le Maestrichien supérieur (KELLER & MACLEOD, 1995, STINNESBECK *et al.*, 1996).

Les arguments en faveur de l'impact météoritique

En 1980, Luis Alvarez et son fils Walter découvrent, dans la coupe de Gubbio (fig. 6-7), en Italie, qu'une mince couche argileuse, séparant le Crétacé du Tertiaire, marquant ainsi le passage de l'ère Secondaire à l'ère Tertiaire, est caractérisée par un abrupt enrichissement en iridium. Ces teneurs anormalement élevées (30 fois plus que la valeur moyenne habituelle des sédiments) en iridium proviendraient d'un objet extraterrestre, astéroïde ou comète, qui serait entré en collision avec la terre il y a 65 millions. La présence dans les sédiments de la limite Crétacé-Tertiaire (KT) de grains de quartz comportant de microcospiques défauts prouveraient également qu'une météorite se serait écrasée sur la terre (fig. 6 D). En effet ces défauts (plans de déformations rectilignes parallèles à certains plans cristallographiques) résultent d'une onde de choc dont la pression dépasserait

plusieurs gigapascals. Mais ces quartz d'impact sont toutefois rarement conservés dans les anciens cratères, car ils sont très sensibles aux épisodes de réchauffement post impact (métamorphisme); identifier leur origine (impact cosmique ou métamorphisme "terrestre") devient alors délicat. Notons toutefois que ces quartz de choc altérés ne sont pas forcément abondants dans les couches de la limite KT, et que leur présence n'est pas systématique. Un troisième indice d'impact cosmique est souvent présent dans la mince couche argileuse, séparant le Crétacé du Tertiaire: le spinelle riche en nickel et en fer (fig. 6 B). Ce minéral résulte de la fusion et de l'oxydation de la météorite, lorsqu'elle entre à grande vitesse dans l'atmosphère. La composition de ces spinelles varie beaucoup d'un site à l'autre et implique des conditions de formation différentes (pression, température, matériel de départ). Les partisans de la théorie de l'impact envisagent la chute de plusieurs objets. Des sphérules de verre, appelées parfois microtectites, plus ou moins altérées en smectite abondent parfois à la limite KT. De l'ordre du millimètre ou plus, ces microtectites sont interprétées comme d'anciennes "gouttes" de roches fondues lors de l'impact. Mais ces sphérules peuvent aussi être produites lors d'éruptions volcaniques. Des micro-diamants de 5 à 6 nanomètres, donc inférieurs à la taille des virus, ont été détectés dans la couche argileuse, d'abord au spectromètre, puis au microscope électronique. On y voit le résultat du choc météoritique sur les particules carbonées contenues dans les roches.

Critères définissant la limite Crétacé-Tertiaire

La coupe d'El Kef en Tunisie a été choisie, en 1989, comme stratotype (section de référence) parce qu'elle comporte presque tous les critères lithologiques, micropaléontologiques, minéralogiques et géochimiques caractérisant la limite KT, à savoir (fig. 8):

1) le passage de dépôts souvent crayeux maestritchtiens à un lit d'argile presque dépourvu en carbonates, souvent sombre, de 60 cm d'épaisseur surmonté par les marnes argileuses du Danien;

2) un mince niveau rouge-jaune (oxydation) de quelques mm à la base du lit d'argile montrant une anomalie élevée de la teneur en iridium, contenant aussi des spinelles nickelifères et des quartz "choqués",

3) une chute du rapport $^{12}C/^{13}C$ des carbonates dans les basses latitudes, interprétées comme une réduction de la productivité phytoplanctonique,

4) un pic en carbone organique suggèrant une mortalité en masse, voir des incendies généralisés sur le continent (très controversé)

5) l'apparition de nouvelles espèces de foraminifères planctoniques à un ou quelques centimètres au dessus du niveau rouge, la disparition des espèces tropicales de grande taille à tests complexes et fortement ornementés, la survivance et l'apparition des espèces cosmopolites de petite taille à tests simples et moins ornementés dans le Danien.

La coïncidence de ces critères aussi bien micropaléontologiques que géochimiques, est assez unique en géologie pour définir une limite et on comprend bien, dès lors, pourquoi le choix de la coupe du Kef et ses caractéristiques ne suscita pas d'opposition. (fig. 8).

Les biozones à microfossiles, spécialement les foraminifères planctoniques, servent à définir la limite KT. Soulignons ici la parfaite isochronie de tous ces indicateurs qu'ils soient micropaléontologiques ou géochimiques. Ce fait est en effet crucial dans la discussion qui va suivre, traitant du fameux site d'impact de Chicxulub, au Yucatan (Mexique). Il faut encore ajouter ici que les caractères de l'extinction des foraminifères planctoniques

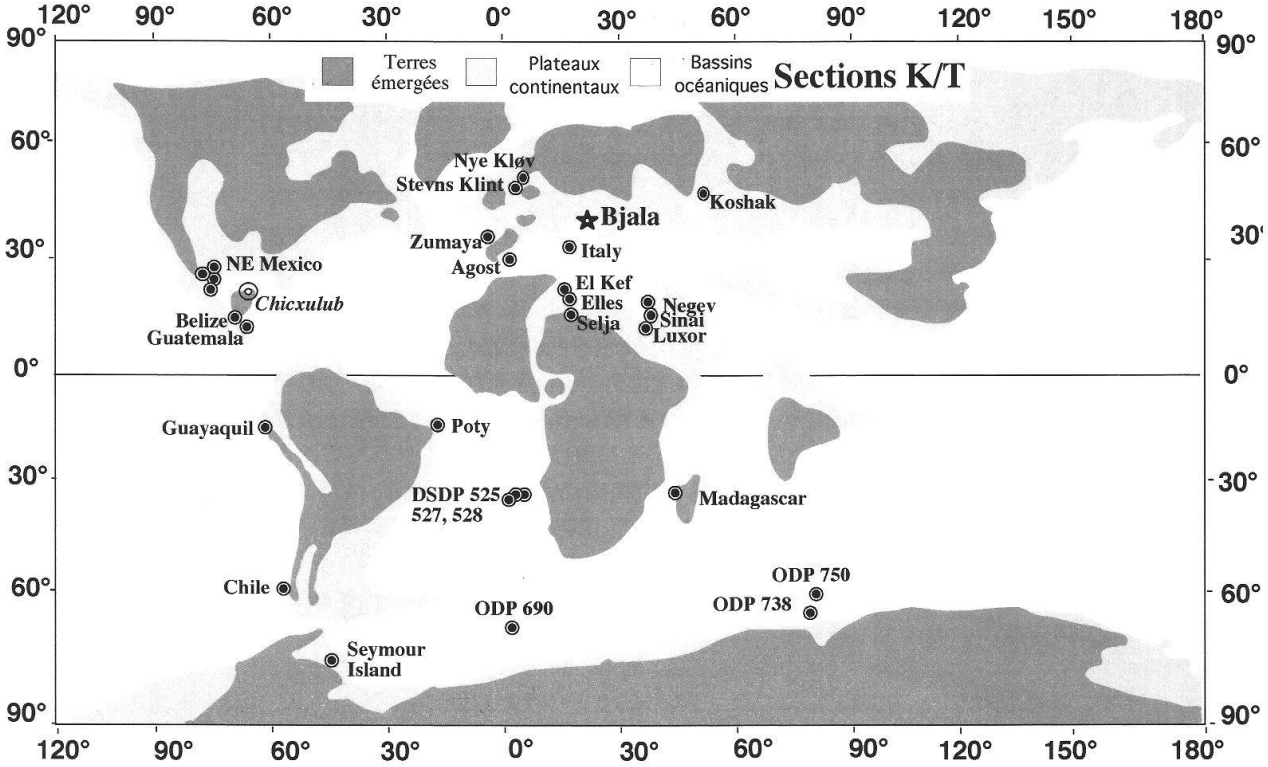


Figure 7: Schéma paléogéographique mondial vers la limite Crétacé-Tertiaire et quelques sites classiques permettant d'étudier celle-ci à l'affleurement ou sur carottages au fond des océans. DSDP = "Deep Sea Drilling Project". ODP = "Ocean Drilling Program". D'après un document modifié de ADATTE *et al.*, 2002.

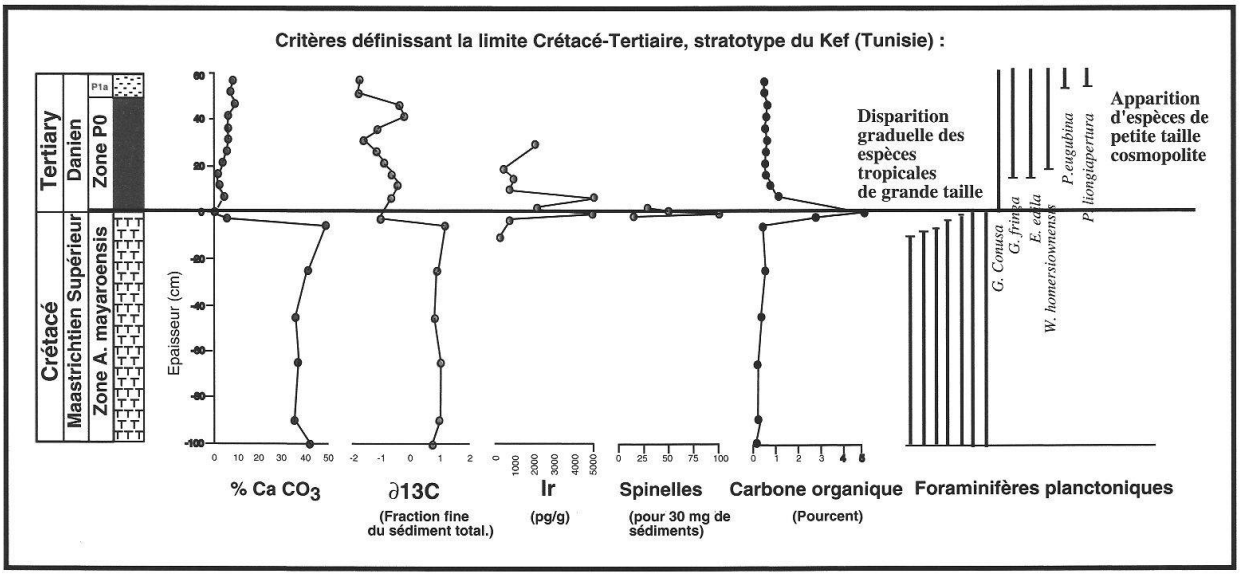


Figure 8: Paramètres géochimiques et biostratigraphiques définissant la limite KT dans le stratotype (GSSP) du Kef, Tunisie.

est plus complexe qu'il n'y paraît, car il s'agit en fait d'une extinction graduelle dans le détail, s'étendant sur environ 500'000 ans (fig. 11) mais s'accélèrant près de la limite (Keller & STINNESBECK, 1996). Une sélectivité d'extinction selon l'architecture du test, la latitude et la profondeur d'habitat est également observée. L'hypothèse d'une seule cause brutale et globale est de ce fait improbable, d'autant plus que d'autres micro-organismes marins tels que les radiolaires et les diatomées sont peu affectés par la crise KT (KELLER & MACLEOD, 1995, HOLLIS, 1995; HOLLIS *et al.*,2003).

La découverte du cratère d'impact de Chicxulub

Si la présence d'une telle quantité d'iridium (Ir), des quartz choqués et de spinelles en un si court laps de temps avaient convaincu la majorité des scientifiques de l'existence d'un impact à la limite KT, il manquait toutefois une confirmation de taille: le cratère que l'impact aurait dû laisser quelque part sur la terre. Le fait que les quartz choqués étaient surtout abondants en Amérique du Nord orientèrent les recherches dans cette région. Les géophysiciens américains découvrent en 1991, à la pointe de la péninsule du Yucatan, une large structure circulaire pouvant correspondre à un cratère d'impact de 200 km de diamètre et qui semblait réunir toutes les caractéristiques du fameux cratère. Il lui fût donné le nom de Chicxulub, tiré d'un site voisin maya signifiant "porte de l'enfer". On constate donc que ce choix n'est pas innocent, médiatiquement parlant. Recouverte de plus de 1000 m de carbonates, cette structure circulaire n'affleure pas. Ce sont des anomalies gravimétriques qui ont révélé sa présence. Soulignons que cette anomalie géophysique avait été déjà détectée, il y a plus de 30 ans, par les géologues pétroliers mexicains et avait été interprétée comme une structure d'origine volcanique. La découverte d'une brèche andésitique dans d'anciens forages traversant cette structure confirment cette hypothèse (LOPEZ RAMOS, 1975). Sous le Tertiaire du cratère potentiel, des sondages pétroliers ont rencontré une "brèche chaotique", à éléments centimétriques et millimétriques, constitués de carbonates, d'anhydrite et fragments de socle qui possèdent des quartz et feldspaths choqués. Cette brèche (= une suévite) résulterait du mélange de 3 km de sédiments carbonatés et évaporitiques avec une partie de socle. En dessous vient une roche fondue, datée à 65 Ma, formée de fragments de socle anguleux ou arrondis fondus, liés par un fond cristallisé à nombreux feldspaths, quartz et pyroxènes calciques et parfois riches en verre. La composition globale de cette roche va de celle d'une andésite à celle d'une dacite, d'où sa confusion probable, au départ, avec une roche volcanique. Cette brèche andésitique est indiscutablement liée a un impact et résulterait de l'explosion et de la fusion des roches de la croûte terrestre et son âge coïnciderait avec la limite KT (datation radiométrique $^{39}Ar/^{40}Ar$: 65 Ma ± 0,1).

UN SCÉNARIO MULTICAUSAL

Chicxulub est il réellement le "Smoking Gun" de la limite KT ?

Si de nombreux faits parlent en faveur d'un site d'impact à Chicxulub, plusieurs problèmes, essentiellement liés à l'âge précis de l'impact, restaient néanmoins à résoudre.

En 1995, une analyse biostratigraphique détaillée des forages effectués par les pétroliers mexicains (LOPEZ RAMOS, 1975) dans le Yucatan par WARD *et al.* (1995) montrent au contraire que cette brèche et plus de 50 m de sédiments sus-jacents sont encore d'âge crétacé (20000-30000 ans avant la limite KT). Même si cette brèche indique un impact, il serait donc antérieur à la limite KT et ne correspondrait donc ni à la couche enrichie en

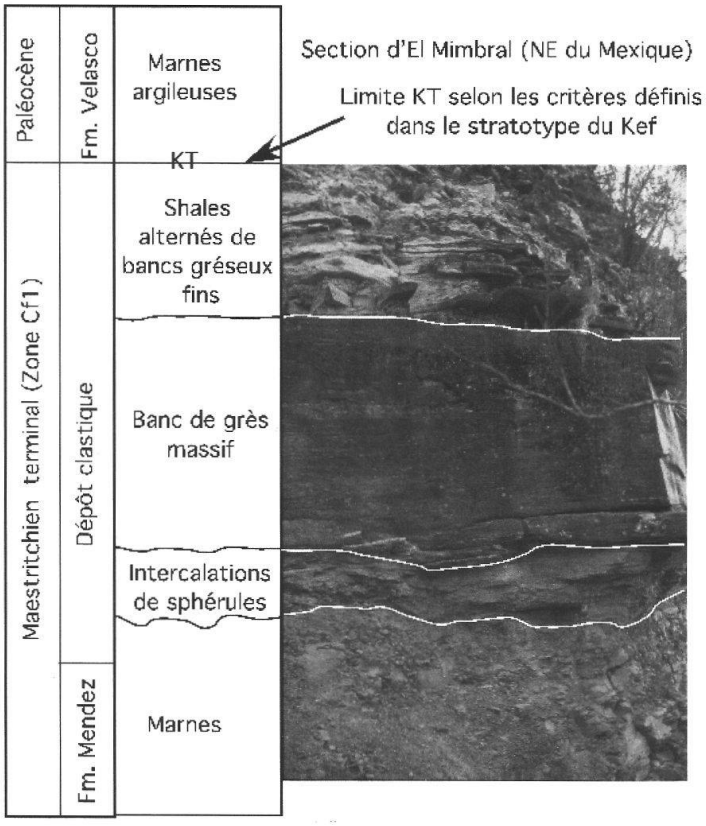


Figure 9: Coupe d'El Minbral, nord-est du Mexique. La couche basale de sphérules (tectites) est séparée de l'anomalie en iridium par plusieurs mètres de sédiments présentant des unités discrètes. L'ensemble de l'unité silicoclastique y compris le niveau basal de sphérules a été interprété comme: (i) un seul événement instatantané (tsunami) résultant de l'impact de Chicxulub, Yucatan (SMIT *et al.*, 1992); (ii) plusieurs événements à long terme constitués de plusieurs coulées gravitaires (turbidites) mis en place dans un contexte tectonique et un eustatisme négatif (ADATTE *et al,* 1996, KELLER & STINNESBECK, 1996).

iridium, ni aux extinctions massives observées dans les autres sites. De récents forages exécutés par les Mexicains confirment la présence de niveaux de cendres volcaniques et de plusieurs niveaux de brèches séparés par plusieurs dizaines de mètres de calcaires normalement sédimentés indiquant plusieurs évènements et non pas un seul. Une étude détaillée de ces nouveaux sondages reste donc impérative pour résoudre ces problèmes. Car, dans le NE du Mexique, à plus de 2000 km du site d'impact présumé (fig. 7), les couches incluant la limite KT, font apparaître le même dilemme. Les tectites sont séparées de la couche argileuse enrichie en Ir par plusieurs mètres de dépôts fins et grossiers, lequels ont été interprétés par Smit et son groupe (1992) comme étant le résultat d'un tsunami, raz de marée géant résultant de l'impact sur le Yucatan (fig. 9). En effet, si on veut relier ces deux dépôts de matériel cosmique à un seul impact sur le Yucatan, les sédiments les séparant doivent être le résultat d'un évènement instantané, d'où l'idée, au demeurant très médiatique, du tsunami. Des analyses sédimentologiques, minéralogiques et micropaléontologiques (STINNESBECK *et al.* 1996, ADATTE *et al.*, 1996,) indiquent au contraire que ces sédiments se sont déposés en l'espace de centaines de milliers d'années avant la limite KT, par des processus classiques (turbidites, écoulements gravitaires), séparés par des périodes d'érosion liées à des fluctuations (régression) du niveau marin. La présence de nombreuses traces de bioturbations présentes au sein des dépôts silicoclastiques attestent de ces périodes à sédimentation réduites (EKDALE & STINNESBECK, 1998 & KELLER *et al.*, 2002). Les tectites du NE du Mexique sont donc antérieures à la limite KT. Ceci impliquerait donc que deux larges impacts se seraient succédé, le premier peu avant la fin du Crétacé, le second à la limite crétacée-tertiaire. De récents travaux de diplôme effectués par des étudiants neuchâtelois dans cette région ont confirmé ces

observations (AFFOLTER, 2000, SCHILLI, 2000, HOURIET, 2002). Leurs études révèlent que les dépôts de sphérules observés dans le NE du Mexique (section de Loma Cerca en particulier, STINNESBECK *et al.*, 2001) sont localisés 6 à 9 m sous les dépôts clastiques (fig. 10), et donc clairement antérieurs aux événement de la limite KT et ne correspondent en aucun cas avec les marqueurs traditionnellement utilisés pour définir celle-ci (biostratigraphie, quartz choqué, Ni-spinelles, iridium). De plus, certaines évidences montrent que les unités silicoclastiques ne peuvent être directement utilisées pour étayer l'hypothèse d'un impact, précisément daté à la limite KT, car elles résultent probablement de dépôts de gravité successifs et étalés dans le temps. Ainsi, si les sphérules du nord-est du Mexique sont liées à l'impact de Chicxulub, celui-ci a eu lieu avant la limite KT.

Le nouveau forage de Yaxcopoil, âge de l'impact de Chicxulub revisité

On constate donc que des doutes subsistent quant à l'origine et l'âge de ces dépôts clastiques et des niveaux de sphérules, leur relation avec le cratère d'impact de Chicxulub et de ce fait l'âge précis et le rôle que ce dernier a joué dans l'extinction en masse observée à la limite KT. La communauté scientifique internationale décide en 2002 de creuser un nouveau forage (Yaxcopoil-1) par le biais de "International Continental Scientific Drilling Program" (ICDP) dans le but de résoudre ces questions, à savoir: (i) préciser l'âge du cratère et son lien avec la limite KT, (ii) évaluer son rôle dans l'extinction en masse et (iii) déterminer exactement la taille et la géométrie du cratère. Selon les indications des géophysiciens, ce forage fut mis en oeuvre à 60 km du centre du cratère. Les spécialistes des impacts étaient persuadés que cette perforation traverserait d'épaisses séries de brèches suévitiques jusque dans le socle, vers –2500 m. Les résultats ne sont pas ceux qu'ils espéraient, car les lithlogies rencontrées sont, de haut en bas (STINNESBECK *et al.*, in press): 790 m de calcaires massifs témoignant de milieux peu profonds, parfois entrecoupés d'épisodes plus pélagiques, 106 m de brèches d'impact (suévite) suivies à nouveau, à la surprise générale, par 617 m de couches calcaires dolomitiques avec des niveaux de gypse et d'anhydrite. Le forage fut stoppé à –1511 m, étant donné qu'il traversait toujours les mêmes lithologies calcaires d'âge Crétacé indiquant des milieux peu profonds de plate-forme carbonatée et que la poursuite de la perforation devenait assez coûteuse. Les partisans de l'existence d'un grand cratère (180-300 km de diamètre) interprètent les 616 m de calcaire comme un megablock glissé dans le cratère, alors que pour notre groupe cette succession est normale (les couches sont horizontales et leur succession temporelle est normale, non chaotique, allant du Cénomanien au Maestrichtien (KELLER *et al.*, 2003). Ce forage est par conséquent situé non pas dans la cavité du cratère mais sur son bord. Sa taille n'excéderait alors pas 80 km de diamètre, ce qui en ferait, somme toute, un impact relativement petit, dont l'influence sur l'extinction KT serait assez insignifiante. Dans le détail, la brèche d'impact est surmontée (fig. 10) par 50 cm de calcaires dolomitisés et finement lités terminés abruptement par un niveau glauconieux vert et suivis par des calcaires fins. La quasi-absence de faune benthique implique que ces sédiments ont été déposés dans un environnement relativement calme et ouvert. Il faut aussi souligner l'absence de clastes issus de la brèche et la rareté des tectites. Un examen micropaléontologique minutieux des sédiments directement sus-jacents à la brèche montre que les 50 cm de calcaires dolomitisés contiennent des foraminifères, mal préservés parce que dolomitisés secondairement, d'âge Maestrichtien terminal (Zone CF1). Ces sédiments ont ainsi été déposés après l'impact de Chicxulub, mais avant l'extinction KT. La brèche d'impact prédate, par conséquent, de 200'000-300'000 ans la

limite KT telle qu'elle a été définie dans le stratotype du Kef, en Tunisie (fig. 8). La topographie accidentée du cratère formé par l'impact pourrait induire des remaniements de faunes plus anciennes et expliquer la présence de ces assemblages d'âge Maestrichien au-dessus de la brèche. Mais l'absence de clastes incluant de grands foraminifères benthiques, qui pourtant pullulent dans les calcaires de plate-forme carbonatée peu profonde sous-jacentes à la suévite et l'uniformité des assemblages observés ne parlent pas en faveur de tels remaniements. L'âge pré-KT de ces brèches d'impacts avait déjà été proposé en 1975, par Lopez Ramos. Son argumentation était basée sur la présence d'un intervalle calcaire de plusieurs mètres d'épaisseur, sus-jacent à la brèche et contenant un assemblage de foraminifères planctoniques d'âge Maestrichien terminal.

Plus haut, les assemblages des foraminifères détectés dans les sédiments directement sus-jacents au niveau glauconieux indique un âge Danien, Tertiaire (Zone P1a). La zone PO qui coïncide mondialement avec la couche enrichie en iridium et constitue la base du Danien (fig. 8) est donc absente. La présence de glauconie confirme ce hiatus, ce minéral étant typique des zones condensées caractérisées par une sédimentation lente et très réduite. D'autres paramètres vont dans le même sens. Aucune anomalie significative en iridium n'a été en effet détectée. La courbe des isotopes stables du carbone montre des valeurs élevées dans les 50 cm de calcaires dolomitiques, typiques du Maestrichtien terminal (fig. 8, KELLER & MACLEOD, 1995) suivies par des valeurs plus faibles, caractéritisques du Danien. Dans l'échelle magnétostratigraphique, l'intervalle très mince sus-jacent à la limite KT indique également un hiatus. On peut d'ailleurs, évaluer l'intervalle de temps manquant en combinant les données micropaléontologiques et magnétostratigraphiques (BERGREEN *et al.*, 1995, MACLEOD & KELLER, 1991). Les zones P0 et P1a (fig. 10) correspondent globalement à la partie supérieure de l'inversion 29R qui couvre les premiers 275 ka du Tertiaire. Dans le forage de Yaxcopoil-1, cet intervalle n'est représenté que par 6 cm de sédiments localisés dans la partie supérieure de la Zone P1a. Ceci suggère un hiatus d'au moins 250 ka et expliquerait l'absence de l'anomalie en iridium typique de la limite KT. De tels hiatus sont communément présents dans les séries avoisinant le golfe du Mexique et les Caraïbes (KELLER *et al.*, 1993; 2003).

Les sédiments d'âge pré-KT observés dans le forage de Yaxcopoil, au dessus de la suévite, peuvent être aussi corrélés avec les coupes du nord est du Mexique, où plusieurs niveaux de tectites sont intercalés dans les marnes pélagiques datées de la Zone CF1, Maestrichtien terminal (P. ex. Coupe de Loma Cerca, fig. 10). La plus vieille de ces couches à sphérules, dont l'état de préservation est excellent, est considérée comme l'éjecta original lié à l'impact de Chicxulub, les autres niveaux résultant de remaniements successifs par des courants. La présence de foraminifères benthiques caractéristiques de milieux peu profonds, de clastes et de débris de rudistes confirment le remaniement des couches supérieures de sphérules (fig. 11). Il est aussi intéressant de noter que le dépôt de la première couche à sphérules coïncide avec le déclin, observé à l'échelle mondiale, de la diversité des foraminifères planctoniques.

Impacts multiples et extinction en masse à la limite KT

L'âge pré-KT de l'impact de Chicxulub suggère un scénario impliquant plusieurs impacts (figs. 10 et 11) dont le plus vieux est lié à la structure de Chicxulub, environ 300'000 ans avant la limite KT. Par ailleurs, 2 autres structures d'impacts, de petite taille ont été récemment mises en évidence, respectivement situées dans la Mer du Nord (Silverpit, STEWART & ALLEN, 2002) et en Ukraine (Boltysh, KELLEY & GUROV, 2002). Un

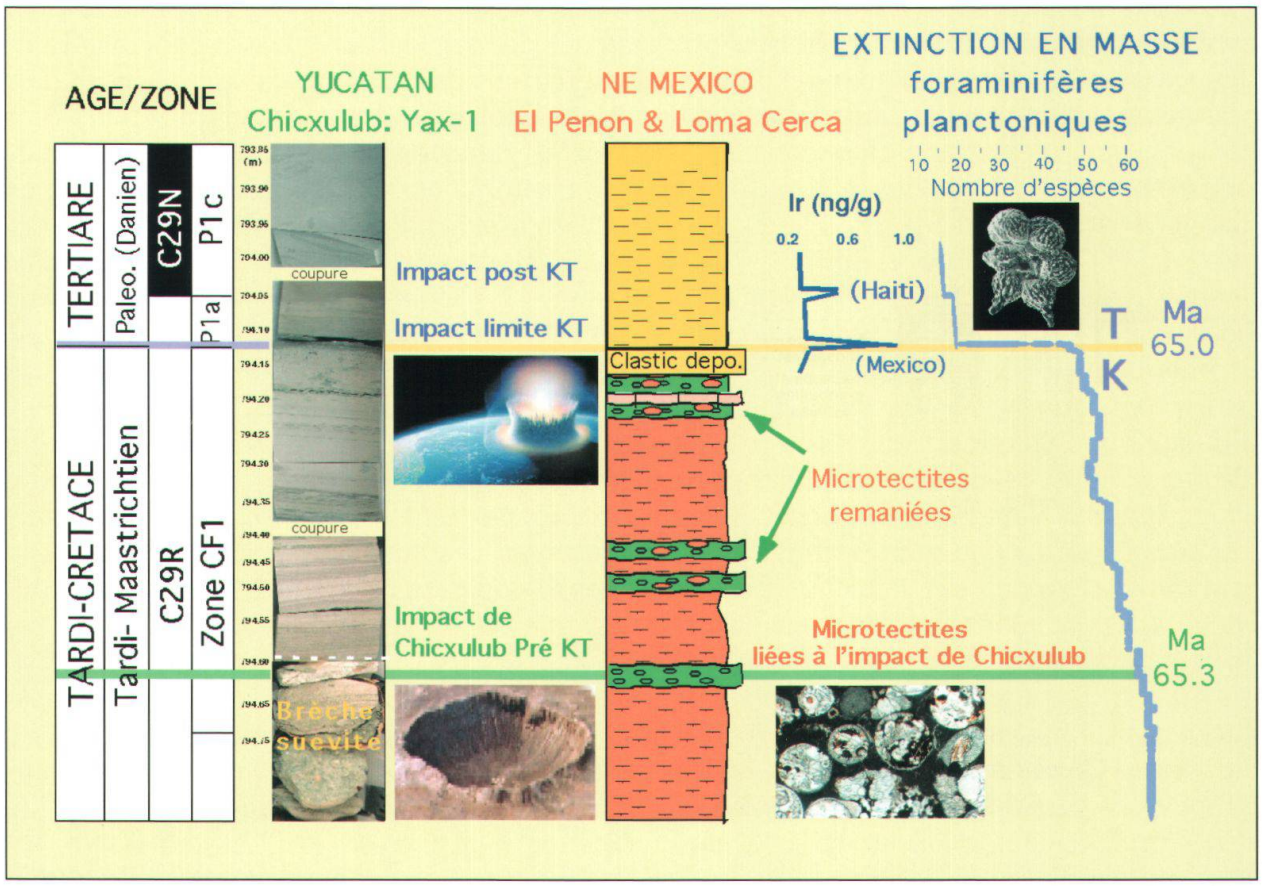


Figure 10:
Corrélation de la brèche d'impact de Chicxulub (Forage Yaxcopoil-1, Yucatan, Mexique) avec la couche de microtectites identifiée dans les sections du nord-est du Mexique et datées du Maestrichtien terminal. Les couches de microtectites les plus jeunes sont considérées comme étant remaniées. L'anomalie classique en Iridium est observée à la limite KT au dessus du dépôt clastique fréquemment interprétée comme résultant d'un mégatsunami généré par l'impact de Chicxulub. L'impact de Chicxulub ne coïncide donc pas avec le début de la chute de la diversité des espèces de foraminifères planctoniques, alors qu'une extinction en masse, est observée à la limite KT.

second impact dont le cratère ne serait plus visible aujourd'hui coïncide avec le niveau enrichi en iridium de limite KT sensu stricto. D'autres anomalies en iridium ont été de plus détectées dans le Maestrichien d'Oman (ELLWOOD *et al.*, 2002). Une anomalie significative en iridium est aussi présente dans des sections localisées à Haïti, au Mexique et Guatemala et datées du Danian basal. Un autre impact pourrait par conséquent avoir eu lieu 1000'000-200'000 après la limite KT (figs. 10 et 12) et pourait expliquer la lenteur de la reconquête des niches écologiques laissées vacantes par les espèces exterminées lors de l'évènement KT.

Une addition de causes néfastes

A plus grande échelle, le Crétacé terminal et la limite Crétacé-Tertiaire coïncident aussi avec une augmentation du volcanisme, plus spécialement en Inde (Traps du Deccan). Cette intense activité volcanique indienne a commencé 400'000 ans avant la limite KT et

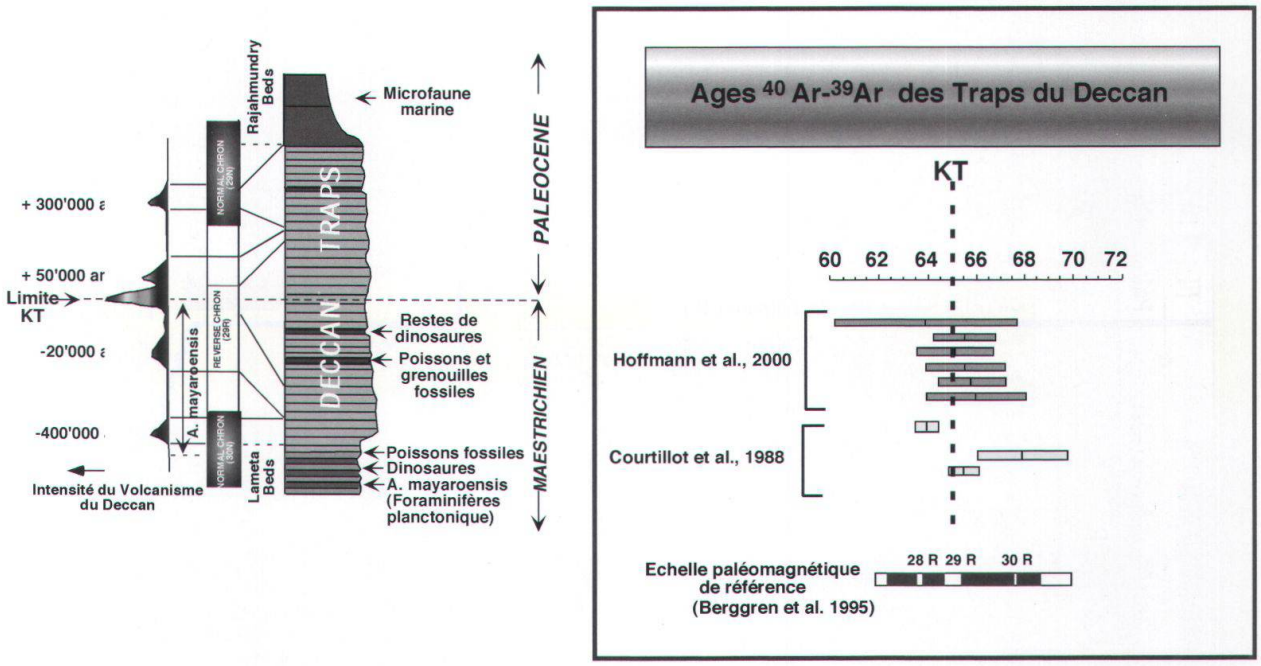


Figure 11: Synthèse des données paléomagnétiques, paléontologiques et géochronologiques concernant les Traps du Deccan et estimation de l'intensité du volcanisme.

s'est poursuivie au moins 400.000 après (fig. 11, COURTILLOT, 1999, HOFFMAN, 2000). L'éruption s'échelonne donc sur environ 800'000 ans, mais son apogée est très proche de la limite KT.

D'autres processus "terrestres" tels que fluctuations du niveau de la mer et changements climatiques sont également associés à ces périodes d'intense volcanisme. La fin du Crétacé est en effet marquée par une régression (chute du niveau de la mer) importante. Le niveau de la mer remonte fortement 100.000-200.000 ans avant la limite KT, celle-ci étant caractérisée par une hausse généralisée du niveau de la mer. Ces fluctuations eustatiques sont probablement liées à des facteurs d'ordres supérieurs tels que expansion océanique et volcanisme et aux conséquences climatiques qui en découlent (fig. 12). La transgression observée à la limite KT serait donc une conséquence indirecte d'un effet de serre dû à une augmentation des émissions de CO_2 dans l'atmosphère liées au volcanisme du Deccan. 3-4 Ma avant la limite KT, certains facteurs (refroidissement climatique, chute du niveau marin) ont donc augmenté dramatiquement les conditions de "stress biologique", constituant le prélude à une extinction massive (LI & KELLER, 1998, LI *et al.*, 2000). Les impacts météoritiques et plus particulièrement celui de la limite KT seraient alors le point d'orgue déstabilisant définitivement un équilibre biologique déjà bien précaire (fig. 12).

Ce scénario est confirmé par le registre fossile. L'extinction observée à la limite KT est rapide mais néamoins graduelle et sélective. Les ammonites disparaissent par exemple systématiquement quelques mètres avant la limite KT. Leur déclin est graduel durant le Maestrichtien supérieur et leur disparition définitive est liée à l'importante régression marine localisée à la fin du Crétacé, environ 200 000 ans avant la limite KT et n'est pas

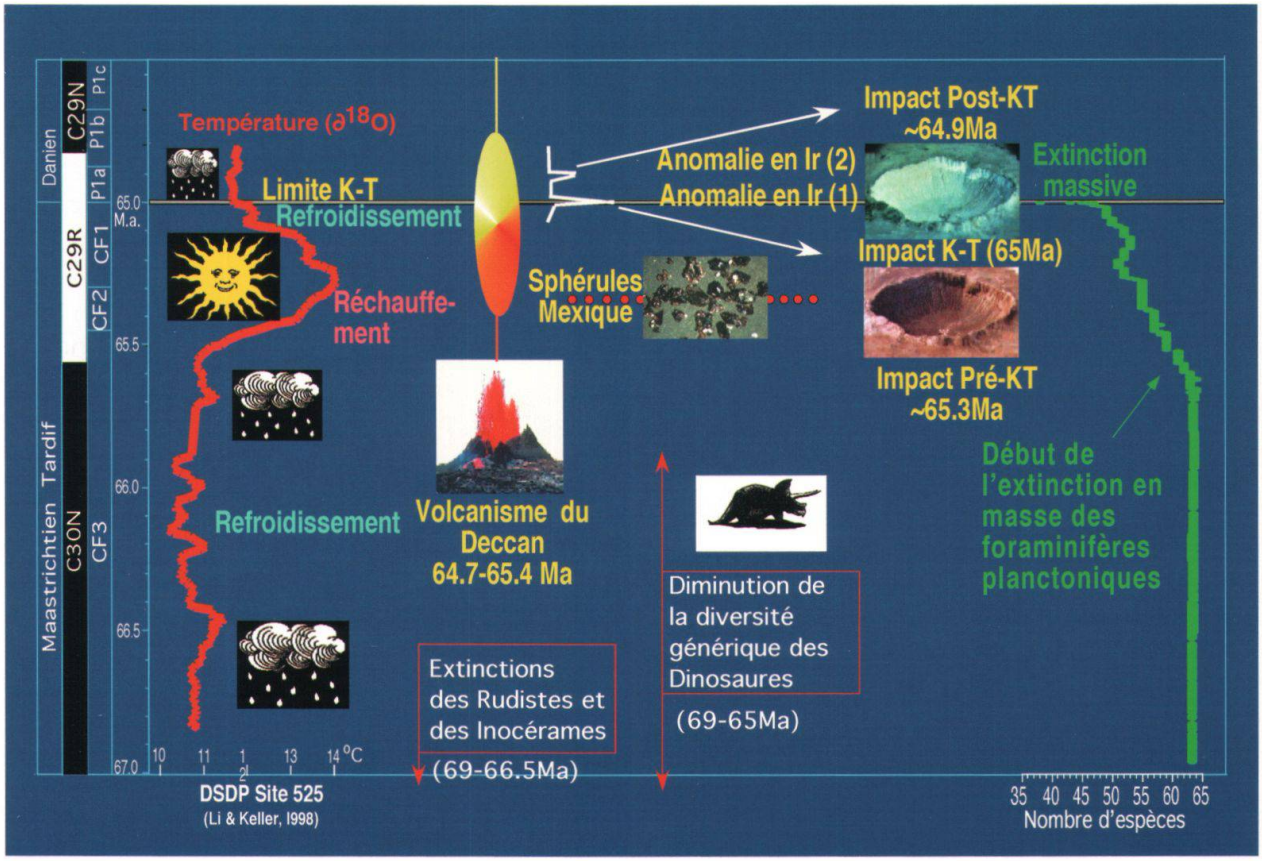


Figure 12: Possible succession des évènements climatiques, volcaniques et impacts multiples ayant conduit à l'extinction de masse de la limite KT. Une période de refroidissement (72,5-65,5 Ma) est indiquée par les isotopes stables de l'oxygène (LI & KELLER, 1998) mesurés dans l'Atlantique Sud (Site 525a) ; ce refroidissement coïncide avec la disparition des bioconstructions à rudistes et la chute graduelle de la diversité générique des dinosaures. Cette période de refroidissement est suivie par un réchauffement (65,5-65,1 Ma) probablement lié au volcanisme du Deccan, coïncidant avec le début de la chute de la diversité des espèces de foraminifères planctoniques. La présence d'une couche à sphérules datée du Maestrichien tardif (65,3 Ma) et de deux anomalies en iridium situées respectivement à la limite KT et dans le Danien basal suggèrent l'existence de plusieurs impacts météoritiques, dont le plus vieux serait lié à la structure de Chicxulub.

liée à l'impact de cette limite. Les rudistes (fig. 12), illustrent bien les conditions instables existant bien avant la limite KT. Ces bivalves adaptés et transformés pour la vie récifale, avaient conquis les mers du Crétacé, spécialement dans les zones chaudes. Leurs derniers récifs sont connus jusqu'à la limite Maestrichtien moyen-Maestrichtien supérieur, c'est-à-dire environ 1,5 Ma avant la limite KT. Des individus isolés subsistent encore pendant 1 Ma et s'éteignent donc avant la limite KT d'après les données disponibles (JOHNSON & KAUFFMAN, 1996). Les inocérames, bivalves fréquents dans les mers de la craie, disparaissent aussi 2 Ma avant la fin du Crétacé. Il n'en restait plus que 6 espèces dans le Maestrichien inférieur.

L'extinction des dinosaures est également graduelle et sélective. Près de 50 % des espèces d'autres vertébrés ont survécu à cette période médiatique, ce chiffre n'est d'ailleurs pas exceptionnel si on le compare avec la crise du Permo-Trias, au cours de laquelle plus 90 % des espèces ont alors disparu. Si l'extinction du Crétacé est plus

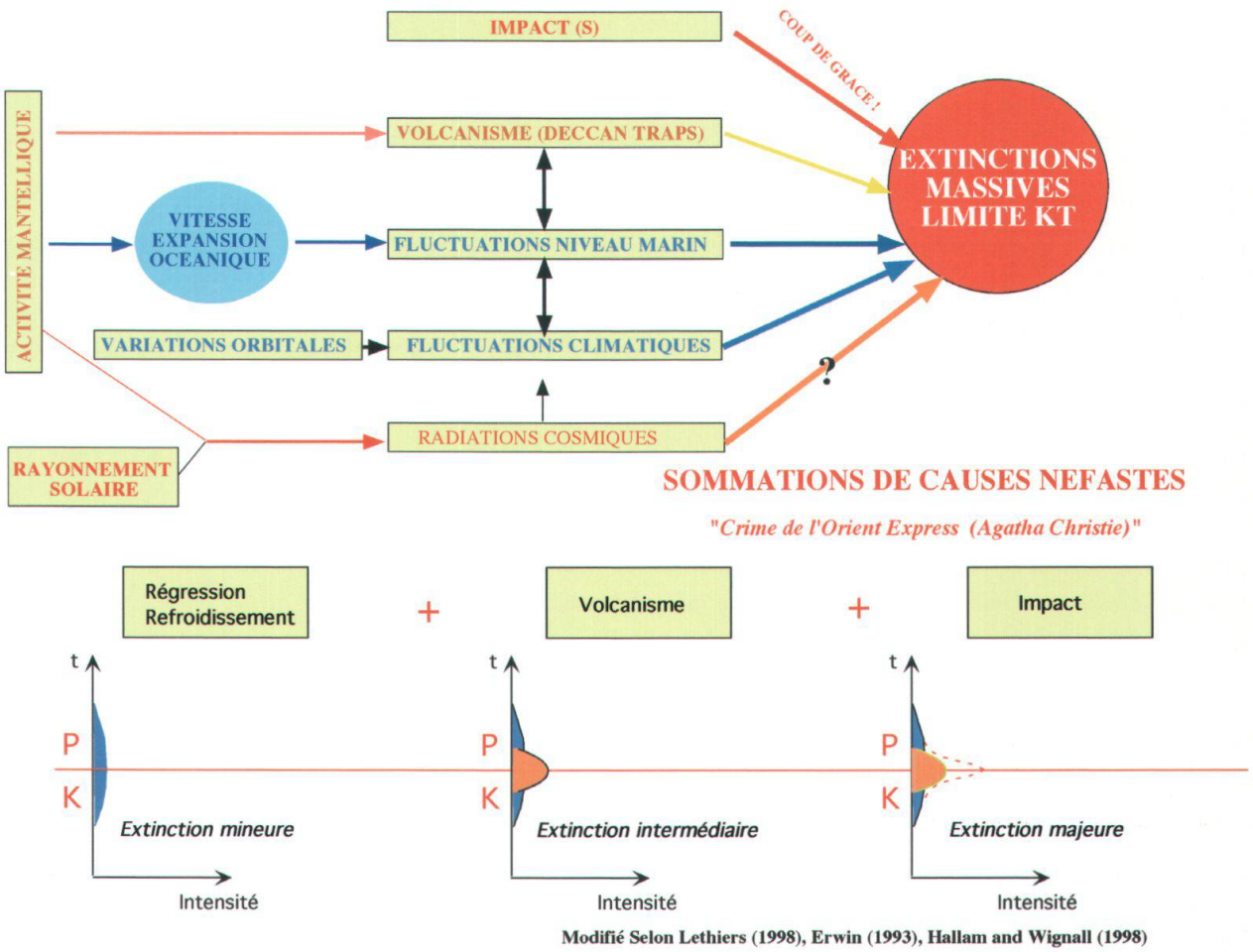
connue, c'est qu'elle concerne la disparition des dinosaures. Pour ces reptiles géants, les impacts n'auront fait qu'apporter le coup de grâce à un processus d'extinction déclenché par une régression marine accompagné d'un refroidissement. Les archives fossiles montrent qu'au cours des dix derniers millions d'années de leur présence en Amérique du Nord, le nombre des espèces de dinosaures est passé de 32 à 19, soit 40 % (ARCHIBALD, 1992). Les dinosaures étaient manifestement sur le déclin bien avant la fin du Crétacé. La rareté des restes fossiles de dinosaures à la transition Crétacé-Tertiaire ne nous renseigne que d'une manière très lacunaire sur l'extinction KT. L'ampleur de la dernière régression du Crétacé terminal reste probablement une des causes majeures de la disparition des dinosaures. La disparition des habitats des basses plaines côtières, la formation de ponts de terre ferme, l'extension des systèmes d'eau douce et les variations rapides du climat (émissions de CO_2, liées aux basaltes du Deccan) sont autant de conditions critiques pour ces reptiles géants. Dès lors, les dinosaures deviennent beaucoup plus sensibles aux perturbations extérieures, qu'elles soient engendrées par un volcanisme intensif ou par la chute de plusieurs astéroïdes sur la Terre.

En tenant compte de toutes ces données, on constate donc que trois causes principales ont agi de concert, à des degrés divers, dans cette extinction massive (fig. 13): intensification de l'activité volcanique, fluctuations du niveau de la mer impliquant une détérioration graduelle de l'environnement bien avant la limite KT provoquant un déclin sélectif et graduel, accéléré probablement par des impacts d'astéroïde avant et à limite Crétacé-Tertiaire.

CONCLUSIONS

L'intervalle de temps précédant la limite KT s'avère donc cruciale pour mieux cerner la complexité de l'extinction en masse de la limite Crétacé-Tertiaire. La période de refroidissement ainsi que les régressions observées dans le Maestrichtien Inférieur et Supérieur sont responsables d'extinctions mineures (rudistes, inocérames) et d'une diminution de la diversité de certains groupes d'organismes. Le volcanisme du Deccan initié 400 ka avant la limite KT est certainement responsable du réchauffement observé mondialement et, qui plus est, coïncide avec le premier impact détecté à Chicxulub au Mexique. La conjonction de ces deux événements a causé une diminution importante de la diversité particulièrement chez les foraminifères planctoniques, mais aucune extinction majeure n'est observée. Par contre, le stress imposé à la biosphère se traduit par l'apparition de formes plus généralistes, cosmopolites, au détriment des formes spécialisées. L'extinction en masse de la limite KT qui coïncide avec un large impact (la grande quantité d'iridium en présence en est une preuve), le paroxysme du volcanisme du Deccan et une transgression généralisée, conduit à l'extinction de toutes les espèces tropicales et sub-tropicales. En fait, cette extinction en masse concerne une communauté d'organismes déjà bien affaiblie par les événements précédents et pourrait résulter d'un refroidissement soudain (fig. 12), lié à l'obscurcissement de l'atmosphère provoqué à la fois par l'impact et le volcanisme.

L'examen un peu plus détaillé de la crise KT montre que la réalité est plus complexe, qu'on ne peut guère ramener les grandes crises du monde vivant à une cause unique. Des perturbations profondes du climat global ont toujours joué un rôle important et celles-ci sont souvent liées à, voire causées par des variations importantes du niveau marin et/ou des périodes d'un volcanisme particulièrement intense. Il s'agit donc d'une addition de causes néfastes qui conduit la biosphère, graduellement affaiblie, à une extinction en masse majeure (fig. 13), à la fois graduelle (fluctuations climatiques et eustatiques, volca-



Figue 13: Synthèse des causes liées à la crise d'extinction de la limite KT. Il s'agit donc d'une addition de causes néfastes qui conduit la biosphère, graduellement affaiblie à une extinction en masse majeure, à la fois graduelle (fluctuations climatiques et eustatiques, volcanisme) et abrupt (impacts multiples). Chacune de ces causes ne suffit pas en elle même à expliquer l'extinction en masse de la limite KT; par contre, leur conjonction peut mener à une extinction en masse de la biosphère.

nisme) et abrupte (impacts multiples). Chacune de ces causes ne suffit pas en elle même à expliquer l'extinction en masse de la limite KT; par contre, leur conjonction peut mener la biosphère à une extinction en masse comprenant à la fois un caractère graduel et un pic d'intensité. La limite Crétacé-Tertaire en constitue un exemple spectaculaire.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement toutes les personnes dont la collaboration et les discussions multiples m'ont permis et me permettent encore aujourd'hui de mener à bien ces recherches sur les mécanismes d'extinction. Je tiens particulièrement à remercier G. Keller, W.Stinnesbeck, U. Kramar, Z. Berner, D. Stüben, A. Pardo, G. Lopez Oliva, S. Abrahamovich, A. Tantawy, K.Foellmi et J. Remane. Ces recherches ont également bénéficié du soutien du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (FNRS).

BIBLIOGRAPHIE

ARCHIBALD, J.D. 1992. Dinosaur extinction: how much and how fast ? *Journal of vertebrates Paleontology*, 12: 263-264.

ADATTE, T.; STINNESBECK, W. & KELLER, G., 1996. Lithostratigraphic and mineralogical correlations of near-K/T boundary clastic sediments in northeastern Mexico: Implications for mega-tsunami or sea level changes? *Geol. Soc. Am. Special Paper* 307: 197-210.

ADATTE, T.; KELLER, G.; BURNS, S.; SSTOYKOVA, K.; IVANOV, M.I.; VANGELOV, D.; KRAMAR, U. & STÜBEN, D. 2002. Paleoenvironment across the Cretaceous-Tertiary transition in eastern Bulgaria. *In:* KOEBERL, C. & MACLEOD, K.G., (Editors), Catastrophic events and mass Extinctions Impacts and Beyond, Boulder Colorado, *Geol. Soc. of America Special Paper* 356: 231-251.

AFFOLTER, M. 2000. Etude des dépôts clastiques de la limite Cretace-Tertiaire dans la région de la Sierrita, Nuevo Leon, Mexique: *MS thesis, Geological Institute, University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland.*

ALVAREZ, L., W.; ALVAREZ, W.; ASARO, F. & MICHEL, M. 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary mass extinction. *Science* 208: 1095-1108.

BERGGREN, W.A.; KENT, D.V.; SWISHER, C.C. & AUBRY, M.P. 1995: A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation. (BERGGREN, W.A. *et al.*, eds.). *SEPM Special Publication* 54: 129-212

COURTILLOT, V. 1999. Evolutionnary catastrophes - The science of mass extinction. *Cambridge University Press.*

COURTILLOT, V.; FERAUD, G.; MALUSKI, H.; VANDAMME, D.; MOREAU, M. G.; BESSE, J., 1988. Deccan flood basalts and the Cretaceous/ Tertiary boundary. *Nature*, 333; 6176, 843-846.

EKDALE, A. A. & STINNESBECK, W. 1998. Ichnology of Cretaceous-tertiary (K/T) boundary beds in northeastern Mexico. *Palaios* 13: 593-602.

ELLWOOD, B.B.; MACDONALD, W.D.; WHEELER, C. & BENOIST, S.L. 2003. The KT boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation. *Earth and Planetary Sci. Letters* 206: 529-540 .

ERWIN, D.H. 1993. The Great Paleozoic Crisis, Life and Death in the Permian. *Columbia University Press New York.*

HALLAM, A. 1989. The case for sea level change as a dominant causal factor in mass extinctions of marine invertebrates. *Phil. Trans, R. Soc. London,* B325: 437-455

HALLAM, A. & WIGNALL P.B. 2000. Mass Extinctions and their Aftermath. *Oxford Universty Press.*

HOFFMANN, C.; FERAUD, G. & COURTILLOT, V. 2000. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of mineral separates and whole rocks from the Western Ghats lava pile: further constraints on duration and age of Deccan Traps. *Earth Planet. Sci. Lett.* 180: 13-27.

HOLLIS, C. J. 1995. Radiolarian Faunal Chnage through the Cretaceous-Tertiary transition of eastern Marlborough, New Zealand. *In:* MACLEOD, N., KELLER, G. (eds) Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction: biotic and environmental changes. *W.W. Norton , Co., New York,* 173-204.

HOLLIS, C.J.; STRONG, C.P.; ROFGERS, K.A. & ROGERS, K.M. 2003. Paleoenvironmental changes across the Cretaceous/Tertiary boundary at Faxbourne River and Woodside Creek, eastern Marlborough, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 46: 177-197

HOURIET, Y. 2002. Les dépôts clastiques a la limite Crétacé-Tertiaire dans l'état du Nuevo Leon, Mexique. *MS thesis, Geological Institute, University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland.*

JOHNSON & KAUFFMAN 1996. Maastrichtian Extinction patterns of Carribean Province Rudists. *In:* MACLEOD, N. , KELLER, G. (eds) Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction: biotic and environmental changes. *W.W. Norton , Co., New York,* 231-273

KELLER, G.; LYONS, J.B.; MACLEOD, N. & OFFICER, C.B. 1993. No evidence for Cretaceous-Tertiary deep-water deposits in the Caribbean and Gulf of Mexico. *Geology* 21: 776-780.

KELLER, G.; LI, L. & MACLEOD, N. 1995. The Cretaceous/Tertiary boundary stratotype section at El Kef, Tunisia: how catastrophic was the mass extinction? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 119: 221-254.

KELLER, G. & STINNESBECK, W. 1996. Sea-level changes, clastic deposits, and megatsunamis across the Cretaceous-Tertiary boundary. *In:* MACLEOD, N. , KELLER, G. (eds) Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction: biotic and environmental changes. *W.W. Norton , Co., New York*, 415-450.

KELLER, G.; ADATTE, T.; STINNESBECK, W.; AFFOLTER, M.; SCHILLI, L. & LOPEZ-OLIVA, J.G. 2002. Multiple spherule layers in the late Maastrichtian of northeastern Mexico. *Geol. Soc. Amer., Special Publication* 356: 145-161.

KELLER, G.; ADATTE, T. & STINNESBECK, W. 2003. The smoking gun: Chicxulub impact predates KT boundary mass extinction. *Geoscientist* 13, 11: 8-11

KELLER, G.; STINNESBECK, W.; ADATTE, T. & STUEBEN, D. 2003: Multiple impacts across the Cretaceous-Tertiary boundary, *Earth-Science Reviews* 1283: 1-37.

KELLEY, S. P. & GUROV, E. 2002. Boltysh, another end-Cretaceous impact. *Meteoritics & Planetary Sci.* 37: 1031-1043.

LETHIERS, F. 1998. Evolution de la biosphère et événements géologiques. G*ordon an Breach Science Publishers.*

LI, L. & KELLER, G. 1998. Abrupt deep-sea warming at the end of the Cretaceous. *Geology* 26: 995-998.

LI, L.; KELLER G.; ADATTE, T. & STINESBECK, W. 2000. Cretaceous sea level changes in Tunisia: A multi disciplinary approach. *Geological Soc, of London* 157: 447-458

LOPEZ RAMOS, E. 1975. Geological summary of the Yucatan Peninsula, in A.E.M. Nairn and Stehli, F.G. (eds.): The ocean basins and margins, Vol. 3, The Gulf of Mexico and the Caribbean. *New York, Plenum Press*, 257-282.

MACLEOD, N. & KELLER, G. 1991. Hiatus distribution and mass extinctions at the Cretaceous- Tertiary boundary. *Geology* 19, 497-501.

PARDO, A.; ADATTE, T.; KELLER, G. & OBERHANSLI, H. 1999. Paleoenvironmental changes across the Cretaceous-Tertiary boundary at Koshak, Kazakhstan, based on planktic foraminifera and clay mineralogy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoeology* 154: 247-273.

RAMPINO, M.R. & HAGGERTY, B., M. 1996. Impact crises and mass extinctions: a working hypothesis. *Geol. Soc. Am. Special Paper* 307: 11-30.

SCHILLI, L. 2000. Etude de la limite KT dans la région de la Sierrita, Nuevo Leon, Mexique. *MS thesis, Geological Institute, University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland.*

SEPKOSKI, J.J. 1994. Extinction and the fossil record. *Geotimes* 39: 15-17.

SMIT, J. *et al.* 1992. Tektite-bearing deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. *Geology* 20, 99-104.

STEWARD, A. S. & ALLEN, P. J. 2002. A 20-km-diameter multi-ringed impact structure in the North Sea. *Nature* 418: 520-521.

STINNESBECK, W.; KELLER, G.; ADATTE, T.; LOPEZ OLIVA, J. G. & MACLEOD, N. 1996. Cretaceous-Tertiary boundary clastic deposits in NE Mexico: Bolid impactor sea-level lowstand. In: The Cretaceous/Tertiary boundary Mass Extinction: Biotic and Environmental Events (edited by N. MacLeod and G. Keller). *Norton Press New-York*, 471-519.

STINNESBECK, W.; SCHULTE P.; LINDENMAIER, F.; ADATTE, T.; AFFOLTER, M.; SCHILLI, L.; KELLER, G.; STUEBEN, D.; BERNER, Z.; KRAMAR, U.; BURNS, S. & LOPEZ OLIVA, J.G. 2001. Late Maastrichtian age of spherule deposits in northeastern Mexico: Implication for Chicxulub scenario. *Canadian Journal of Earth Sciences* 38: 229-238

STINNESBECK, W.; KELLER, G.; ADATTE, T.; HARTING, M.; STÜBEN, D.; ISTRATE, G. & KRAMAR, U. In Press. Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact. International Journal of Earth Sciences. Walliser, O.H. 1996. Global events and Events stratigraphy. *Springer, Berlin.*

WALLISER, O.H. 1996. Global events and Events stratigraphy. *Springer, Berlin.*

WARD, W.C.; KELLER, G.; STINNESBECK, W. & ADATTE, T. 1995. Yucatan subsurface stratigraphy: implications and constraints for the Chicxulub impact. *Geology* 23, 10: 873-876.