



HAL
open science

Deux (et bientôt peut-être trois) siècles de controverses sur la limite Crétacé-Tertiaire

Charles Pomerol, Gérard Bignot

► To cite this version:

Charles Pomerol, Gérard Bignot. Deux (et bientôt peut-être trois) siècles de controverses sur la limite Crétacé-Tertiaire. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2000, 3ème série (tome 14), pp.29-47. <hal-00925447>

HAL Id: hal-00925447

<https://hal.science/hal-00925447v1>

Submitted on 10 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

TRAVAUX
DU
COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE
- Troisième série -
T.XIX (2000)

Charles POMEROL et Gérard BIGNOT
Deux (et bientôt peut-être trois) siècles de controverses
sur la limite Crétacé-Tertiaire

COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGEO) (séance du 22 mars 2000)

Cette note ne prétend pas être une étude exhaustive des événements survenus à la limite Crétacé-Tertiaire (en abrégé K/T), ce qui exigerait de faire référence à plusieurs milliers de publications, mais simplement de mettre en lumière quelques données historiques éclairant un débat qui s'avère pluriséculaire.

Notre propos vise à présenter brièvement l'état actuel de la question, et surtout à évoquer le comportement des principaux protagonistes lors de discussions passionnées et de publications incendiaires. Laissant de côté le Maastrichtien, unanimement considéré d'âge crétacé, nous analyserons les positions respectives du Danien, du Montien et du Calcaire de Vigny vis-à-vis de la limite K/T, et le rôle éventuel joué par les événements catastrophiques : éruptions volcaniques, important eustatisme négatif, impact météoritique.

k k k

Il est exceptionnel qu'un débat scientifique déborde la durée d'une ou deux générations comme ce fut le cas pour la dérive des continents, relayée par la tectonique des plaques. Pourtant, les controverses concernant la limite K/T, surgies au début du XIX^e siècle, d'abord paléontologiques et relatives à la position stratigraphique du Danien, ont fait place à celles, davantage géochimiques, qui opposent aujourd'hui météoristes et volcanistes pour expliquer la crise biologique de la fin du Crétacé. Parallèlement s'amorce, avec des arguments nouveaux, la renaissance du catastrophisme au détriment du gradualisme, encore incontesté voici peu. Cette querelle, amplifiée par la médiatisation des dinosaures et la prise en considération, récente en géologie, des phénomènes orbitaux et spatiaux, a conquis une audience qui dépasse largement celle des spécialistes.

I. « Le Danien, nouvel étage de la craie », par [Edouard Desor](#) (1846/47)

En 1825, à la suite de S. Abildgaard (1759), avant même la création de l'étage danien, G. [Forchhammer](#) publie une description précise de la falaise de Stevns (Stevns Klint), à 35 km au Sud de Copenhague. A l'époque, le rayonnement de l'école française de géologie est tel que [Forchhammer](#) estime que le Calcaire à cérithes de Stevns Klint est l'équivalent du Calcaire grossier parisien, et l'argile sous-jacente comparable aux formations sparnaciennes.

Un peu plus tard, se fondant sur la découverte de *Belemnites mucronatus* et de *Baculites faujassii* [sic], [Charles Lyell](#) attribue, en 1838, un âge crétacé au Calcaire à cérithes. Ces fossiles n'ont pas été retrouvés et W. K. Christensen (1997), spécialiste des bélemnites, n'en connaît aucune dans le Danien. Par ailleurs, la présence, signalée par Tove [Birkelund](#) (1993), de fragments de moules internes d'ammonites *Hoplioscapites constrictus* et de *Baculites vertebralis* emplis de nannofossiles maastrichtiens ne laisse planer aucun doute sur leur remaniement, si bien que Tove Birkelund est formelle : « *There is no evidence for indigenous Danian Ammonites in the Danish sequence* » (1993 : p. 42).

Il est piquant de constater qu'avant même d'être créé, le Danien navigue déjà entre le Crétacé (selon Lyell) et le Paléogène (selon Forchhammer).

La création de l'étage remonte au 16 novembre 1846, lorsque [Edouard Desor](#) présente oralement devant la Société géologique de France, un exposé intitulé « *Sur le terrain danien, nouvel étage de la craie* ». Le texte en fut publié l'année suivante. La coupe observée, par lui, dans l'île de « *Seeland, à quelques milles au Sud de Copenhague [comprend] la craie blanche avec ses fossiles caractéristiques tels que l'Ananchytes ovata, l'Ananchytes striata, Galerites albogalerus, etc. [qui] forme l'assise inférieure baignée par les eaux de la mer. Au-dessus de la craie se trouve une mince couche d'argile, renfermant de nombreux débris de poissons qui, jusqu'ici, n'ont pu être déterminés à cause de leur état de conservation imparfait. Au-dessus de ce banc d'argile, se trouve le Calcaire de Faxoë avec le Cidaris que M. Desor propose d'appeler Forchhammeri [...]. Au-dessus du Calcaire de Faxoë, se trouve un étage plus puissant d'un calcaire également riche en coraux, et que M. Forchhammer désigne, pour cette raison, sous le nom de craie corallienne* » (1847 : p. 179-180). Ces deux dernières formations sont appelées aujourd'hui Calcaire à cérithes et Calcaire à bryozoaires. Il ne fait aucun doute que la section décrite par E. Desor est celle de Stevns Klint dans l'île de Sjaelland (= Seeland).

Pour Desor, « *il est évident que le terrain dont il s'agit n'est point une simple forme locale de la craie blanche, puisqu'il se trouve superposé à cette dernière [...] et qu'il contient des espèces qu'on n'a pas trouvées jusqu'à présent dans la craie blanche. D'un autre côté, la présence de genres tels que les Ananchytes, les Holaster et les Micraster, ne permet pas de rapporter ce terrain à l'étage tertiaire.*

M. Desor pense dès lors qu'il faut envisager le calcaire de Faxoë, la craie corallienne et, par extension, le lambeau pisolithique de Laversine et de Vigny, comme un étage particulier de la craie, le plus récent de tous [...]. M. Desor propose d'appeler cet étage terrain danien, parce qu'il est surtout développé dans les îles du Danemark (1847 : p. 181).

Les travaux qui se sont alors succédé pendant un demi-siècle concernent le contenu du Danien et ses corrélations avec les formations du même âge au Danemark et en Europe ; cependant l'appartenance du Danien au Crétacé n'est pas remise en cause.

II. Le Montien, étage partagé entre Crétacé et Tertiaire

Le Montien a été créé en 1868 par le géologue belge G. Dewalque, après que la formation ait été reconnue et nommée Calcaire grossier de Mons par F. L. Cornet & A. Briart (1865) dans leur *note sur la découverte dans le Hainaut, au-dessous des sables rapportés au système landénien, d'un calcaire grossier avec faune tertiaire*. Ainsi, trois ans avant sa création, le Montien était-il attribué au Tertiaire.

Le calcaire de Mons surmonte le Tuffeau de Ciplu attribué au Crétacé par F. L. Cornet & A. Briart (1865), tandis que la majorité des auteurs le placent dans le Tertiaire. Pour A. Rutot & E. van den Broeck (1886), les fossiles caractéristiques du Calcaire de Mons se développent dès le poudingue de base (dit de la Malogne), qui sépare le Tuffeau de Ciplu de celui de Saint-Symphorien sous-jacent, d'âge maastrichtien. Cependant F. L. Cornet & A. Briart maintiennent obstinément un âge crétacé pour le Tuffeau de Ciplu, confortés en cela par E. [Munier-Chalmas](#) & [Albert de Lapparent](#) (1893) qui corrélaient le Calcaire de Mons avec la partie supérieure du Danien alors attribué au Crétacé.

Cette opinion prévaut dans la légende de la carte géologique détaillée de la Belgique, publiée en 1929, et dans laquelle le Tuffeau de Ciplu est associé au Calcaire de Mons. Ce Montien nouvelle version est placé tout entier dans le Crétacé. M. Leriche (1937) rétablit la situation et l'attribution du Tuffeau de Ciplu au Danien moyen est acceptée par la plupart des paléontologistes. Le Calcaire de Mons, d'abord considéré comme étant plus récent que la partie supérieure du Danien, est en réalité synchrone du Danien moyen et supérieur (Bignot 1993).

Au total, les vicissitudes concernant la position stratigraphique du Montien tiennent plus à son rattachement au Danien, tel qu'il était conçu par les auteurs de l'époque, qu'à ses caractères paléontologiques intrinsèques.

III. L'attribution du Danien au Tertiaire par A. de Grossouvre (1897)

C'est [Albert de Grossouvre](#)^[1] qui, le premier, en se fondant sur l'extinction des ammonites, des bélemnites, des rudistes et des inocérames, propose voici un siècle (1897) de placer le Danien à la base du Tertiaire : « *La limite entre la Craie [lisez Crétacé] et le Tertiaire [...] se dessine avec une netteté extraordinaire ... [et le Tertiaire débute par] ... des couches qui renferment Nautilus danicus, mais où l'on ne rencontre plus ni Ammonites, ni Scaphites, ni Baculites* » (1897 : p. 72). Cette conclusion est refusée sans ménagements par E. [Munier-Chalmas](#) (1897a) et [Henri Douvillé](#) (1897), à l'époque chefs de file de la stratigraphie et de la paléontologie françaises. De Grossouvre n'en maintient pas moins son point de vue dans plusieurs publications ultérieures (1901 & 1902), allant même jusqu'à envisager que le Danien et le Montien sont synchrones. Les deux géologues danois K. B. Nielsen (1919) et [Alfred Rosenkrantz](#) (1920) se rallient à son point de vue ; toutefois, dans leur pays même, leurs collègues A. Hennig (1899), et surtout J. P. J. Ravn (1903 & 1925) insistent sur les affinités entre les fossiles du Danien et ceux du Maastrichtien : « *La faune du Danien baltique renferme certes une part d'éléments tertiaires, mais [...] cette faune a [...] un cachet crétacé prépondérant et elle ne rend nullement nécessaire d'écarter le Danien du Crétacé pour le placer dans le Tertiaire* » (Ravn 1925 : p. 36).

Les « *tertiaristes* » restent isolés. Pour s'en tenir aux géologues français influents (Munier-Chalmas 1897b, [Albert de Lapparent](#) 1906, [Emile Haug](#) 1911), tous placent le Danien dans le Crétacé. Cette opinion prévaut dans le Lexique stratigraphique international (1957), compilé par [Th. Sorgenfrei](#), ainsi que dans la cinquième édition du traité de [Maurice Gignoux](#) (1960). Cependant les idées évoluent, et lors du Colloque sur le Paléogène, tenu à Bordeaux en 1962, H. W. Rasmussen, après avoir reconnu la validité de la limite K/T à la base du Danien, se retranche, contre toute attente, derrière les commodités et le poids des traditions pour la récuser : « *On doit considérer qu'une modification de cette limite augmenterait les difficultés d'emploi des ouvrages de référence et autres publications contenant un index stratigraphique. Il faut remarquer que la grande majorité des fossiles du Danien sont décrits dans un grand nombre de monographies et de publications traitant des fossiles du Sénonien mais rarement des fossiles du Tertiaire. Là, un changement de limite apporterait certaines complications et aucune simplification aux travaux des géologues et des paléontologistes* » (1964 : p. 872).

Plus que les échinides du genre *Tylocidaris* (Odum, 1926 ; Nielsen, 1937), ce sont les mollusques, à partir de l'inventaire réalisé par A. Rosenkrantz pour le 21^e Congrès géologique international tenu à Copenhague en 1960, qui apportent les plus forts arguments en faveur de la thèse des tertiaristes. Il apparaît en effet que, si la plupart des genres de lamellibranches, à l'exception des inocérames et des rudistes, passent du Crétacé au Tertiaire, d'autres apparaissent après la limite. Parmi les 75 genres ou sous-genres de gastéropodes, 34 franchissent la limite, et 38 sont uniquement tertiaires. Un seul, *Urceolabrum*, n'est connu qu'au Crétacé, et deux autres, *Faxia* et *Tripanaxis*, sont strictement daniens. Par ailleurs, la disparition des ammonites (en particulier *Scaphites* et *Baculites* fréquents dans le Maastrichtien) et des bélemnites contraste avec la diversification des nautilus. A. Rosenkrantz en conclut que la limite K/T doit être placée entre le Maastrichtien et le Danien, et insiste sur l'argument fondamental d'[Albert de Grossouvre](#), à savoir l'extinction des ammonites. Cependant, comme le note A.D. Yanshin au cours de ce même congrès, malgré l'avis des spécialistes, « *yet the majority of geologists in all countries continues to regard the Danian as the upper stage of the Cretaceous system* » (1960 : p. 210).

Alors que les opinions exprimées lors du Congrès de 1960 sont encore partagées, le consensus est général au symposium des *Cretaceous-Tertiary Boundary events* également tenu à Copenhague en 1979 : le Danien est définitivement attribué à l'ère Cénozoïque. Plus que la macrofaune, ce sont, à l'époque, les microfossiles qui emportent la décision. Les travaux de Martin Glaessner (1937), de N. N. Morozova (1946), de [Jean Cuvillier](#) & collaborateurs (1955), de M.-B. Cita (1955) et de bien d'autres, soulignent la coupure nette chez les foraminifères planctoniques à la fin du Maastrichtien, aussi bien aux USA (Midway Group en Alabama), en Pologne, en URSS, dans les pays méditerranéens, que dans les régions nordiques. Partout l'association de *Globotruncana*, *Globigerinelloides* et *Rugoglobigerina*, caractéristique du Maastrichtien, fait place, dès les premiers niveaux daniens, à une association nouvelle, à petits globigérinidés.

IV. Les controverses à propos du Calcaire pisolithique de Vigny

Contrecoup de cette controverse, l'âge du Calcaire pisolithique de Vigny fut âprement débattu. En 1836, [Charles d'Orbigny](#) lui donne son nom et le considère d'âge tertiaire, dix ans avant que Desor l'associe au Danien et l'attribue au Crétacé. Comme le Danien, le Calcaire pisolithique a été, dès les premiers temps de sa reconnaissance, écartelé entre le Crétacé et le Tertiaire.

Tout au long du XIX^e siècle le débat reste ouvert (Soyer, 1943), avec une propension pour le Crétacé en dépit de l'opposition d'A. [d'Archiac](#) et de [Gustave Dollfus](#) (1897). Le Calcaire pisolithique suit les vicissitudes du Danien auquel il est partiellement corrélé. Au début du XX^e siècle, les tertiaristes l'emportent avec A. de Grossouvre, pour qui le Danien stratopique est cénozoïque (1901), avec J. Lambert (1907) qui se fonde sur les échinides, et avec [Emile Haug](#) (1911) qui invoque les analogies entre les faunes daniennes et montiennes. Mais cette même année 1911, tout est remis en question par [Paul Lemoine](#), pour qui Vigny et Montainville seraient des récifs crétacés. A partir de cette date, et pendant un demi-siècle, la controverse, ravivée, donne lieu à des affrontements épiques. Le plus mémorable est celui qui agita les membres de la Société géologique de France lors de la visite de la carrière, le 17 mars 1912.

L'argumentation de G. F. Dollfus (1912), et plus tard celle de J. Lambert (1920), vinrent à bout de la conviction de P. Lemoine, que celui-ci finit par abandonner (1937). Elle fut reprise à nouveau par H. Alimen, A. F. de Lapparent et G. Lucas (1948) ainsi que par P. Desmidt (1960) et par R. Marlière (1958), lequel exprime avec vigueur l'opinion selon laquelle « *l'observation du terrain ne laisse aucun doute sur l'âge campanien du récif [...]. L'interprétation paléontologique doit se soumettre au commandement stratigraphique* » (1958 : p. 751 et 754).

Pourtant, depuis longtemps, chacun pouvait prendre connaissance du témoignage des micropaléontologistes puisque, dès 1937, Pierre Marie avait établi que « *le Calcaire pisolithique est caractérisé par une faune de Foraminifères d'origine tropicale n'ayant aucun rapport avec celle du Maastrichtien, mais présentant de grandes affinités avec le Tertiaire* » (p. 294). Si, à partir des mollusques, A. Chavan (1948) hésite encore entre « *un dernier terme du Crétacé [et] une nette affinité avec le Tertiaire* », les foraminiféristes ([Abrard et al.](#), 1949) et les ostracodistes ([Damotte & Feugueur](#), 1960, puis [Damotte](#) 1964) sont formels : le récif de Vigny s'est bien édifié au Cénozoïque, un peu après la limite K/T.

Il restait cependant un problème, d'ordre sédimentaire et structural : la présence, à l'est du front nord, d'une masse crayeuse, épaisse de 5 à 7 m, reposant sur le Calcaire pisolithique. En application du principe de superposition, elle apparaît plus récente que le calcaire sous-jacent. Le calcaire récifal semble alors interstratifié dans la craie campanienne. Un examen attentif de cette craie recouvrant le Calcaire pisolithique montre qu'elle est bréchique, sans stratification, et les silex, au lieu de former des lits parallèles, sont dispersés dans la masse ([Pomerol et Feugueur](#), 1986). Cette craie a perdu sa structure initiale, et c'est, en réalité, un matériau crayeux dissocié qui s'est répandu sur le récif. Le fluage a été probablement favorisé, au cours du Quaternaire, par le rejeu de l'anticlinal de Vigny et la présence d'un pergélisol.

V. La crise biologique de la limite K/T

En son temps, A. de Grossouvre avait noté, à la fin du Crétacé, la disparition de nombreux invertébrés et avait fait de cet événement son argument principal pour placer le Danien à la base du Tertiaire. Parallèlement, il avait souligné l'importance biologique du phénomène : « *Il y a donc eu là pour certains groupes d'êtres un arrêt brusque et en quelque sorte instantané qui n'est pas sans causer une vive surprise à l'observateur habitué à constater d'ordinaire l'enchaînement et la continuité des faunes. On peut dire sans exagération, qu'on est en présence d'une des dates les plus remarquables de l'histoire de la Terre* » (1897 : p. 73).

Plus tard, comme dit ci-dessus, les premiers travaux micropaléontologiques mirent en évidence, également à la base du Danien, le renouvellement total des associations d'un groupe de microfossiles, les foraminifères planctoniques.

Les chercheurs n'ont pas manqué de se passionner pour ces avatars du monde vivant. L'échelonnement et la sélectivité des phénomènes ont fait l'objet d'une foule de publications, dont une synthèse a été tentée par F. Lethiers (1998).

L'évolution des principaux groupes de plantes supérieures ne montre pas de rupture au passage K/T. Parmi les organismes marins chlorophylliens, les dinoflagellés susceptibles de s'enkyster n'ont guère souffert. En revanche la réponse des nanfossiles calcaires est plus controversée. Selon certains auteurs, ils disparaîtraient presque tous, alors que pour d'autres une fraction significative traverserait la limite. En Tunisie, à El Kef, stratotype de la limite, 70% des espèces de foraminifères planctoniques s'éteignent dans un intervalle compris entre 25 cm sous l'anomalie en iridium et 15 cm au dessus. 30% survivent mais s'éteignent dans les 5 m sus-jacents. Les foraminifères benthiques ([Bignot](#) 1984), les radiolaires et les diatomées paraissent peu affectés ou ne le sont pas (fig. 1).

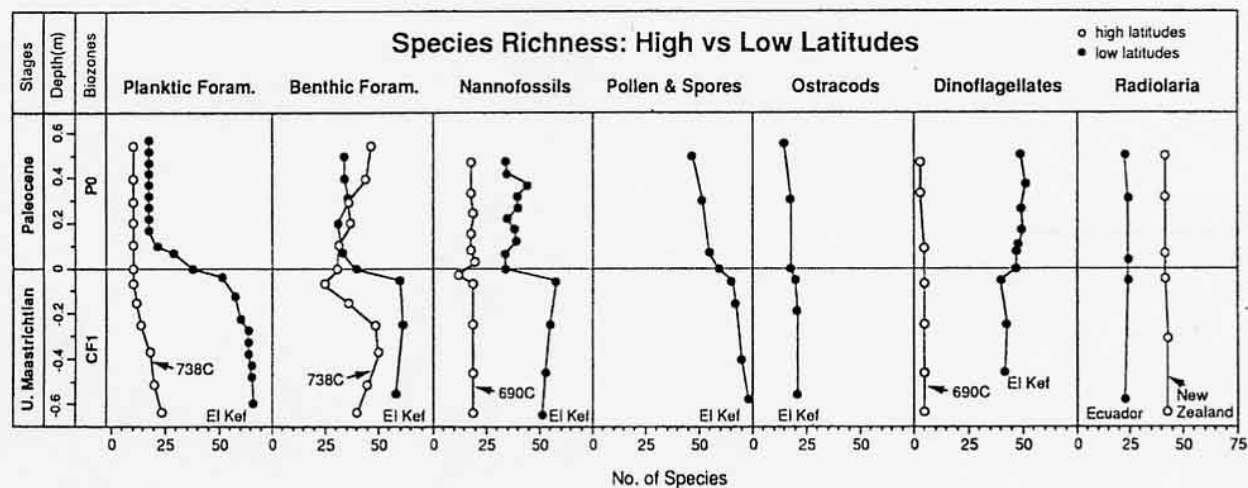


Figure 1 - Richesse spécifique en microfossiles marins des hautes et basses latitudes de part et d'autre de la limite K/T. Les changements ne sont notables que pour les foraminifères planctoniques et les nannofossiles et seulement pour les basses latitudes. La chute de la diversité des foraminifères benthiques s'explique par une émigration temporaire des espèces et la reconquête de leur habitat primitif au cours du Danien. D'après Keller *et al.* (1998 : p. 489, fig. 3).

Chez les céphalopodes, ammonites et bélemnites disparaissent, et quelques espèces seulement atteignent la limite après un déclin amorcé 6 Ma auparavant. Cependant, nautilus, seiches, calmars et poulpes persistent sans dommage. Les bivalves passent la limite sans grands problèmes (Heinberg, 1999), à l'exception des inocérames (Dhondt, 1989 ; MacLeo & Orr, 1993) et des rudistes (Philip, 1998) qui disparaissent respectivement 2,5 et 1 Ma avant la limite. On note encore 70% d'extinctions chez les brachiopodes articulés et 60% chez les bryozoaires.

Le cas des ostracodes souligne bien le caractère sélectif de la crise. Les espèces marines inféodées aux milieux néritiques sont anéanties, tandis que 50 à 70% des espèces du domaine bathyal se retrouvent au Danien. En revanche, celles inféodées aux eaux douces et particulièrement les associations connues en Inde dans les épisodes sédimentaires lacustres intratrapéens, sont identiques de part et d'autre de la limite K/T (Guernet, 1997 ; Bhandary & Colin, 1999).

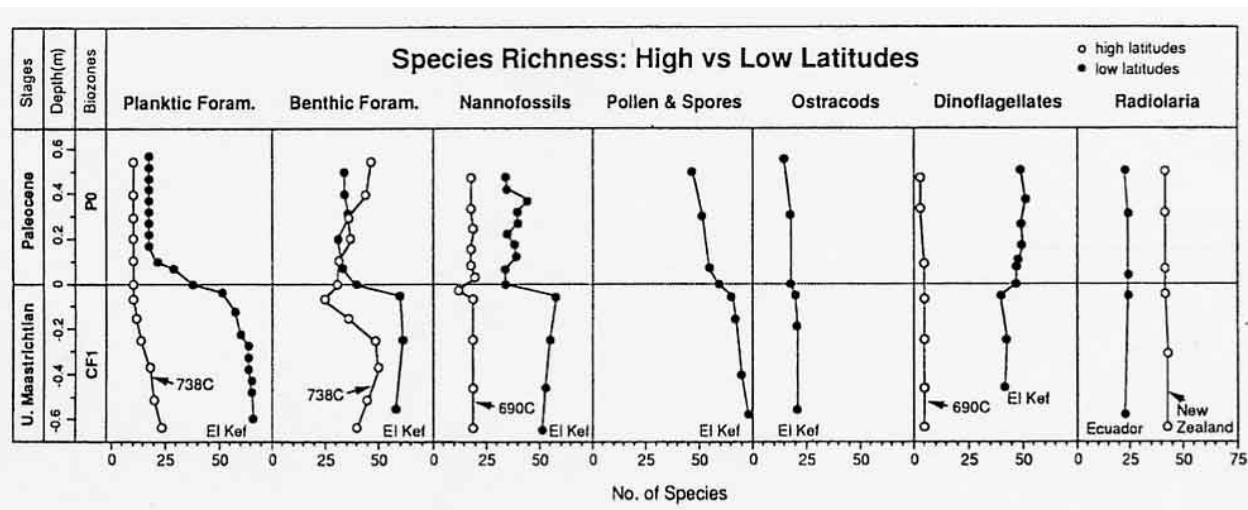


Figure 2 - Position chronologique, paléomagnétique et biostratigraphique de la limite K/T et des étages qui l'encadrent. Dans la colonne de droite les sigles I-IV et Ma-Md indiquent (sans fixer précisément leur place par rapport aux biozonations) les différentes formations reconnues dans les stratotypes. CM = Calcaire de Mons ; TC = Tuffeau de Ciply. La précision biostratigraphique moindre pour le Crétacé terminal (de l'ordre de 1 Ma) que pour le Paléocène basal (de l'ordre de 0,1 Ma) est due, d'un côté, à la rareté des apparitions de taxons dans le Crétacé, et de l'autre, à leur grand nombre dans le Paléocène. D'après divers auteurs dont Bolli *et al.*, 1985 et Berggren *et al.*, 1995.

A l'inverse de ce qui est généralement aisé à partir des sédiments marins, il est beaucoup plus difficile d'établir avec précision l'âge des sédiments déposés sur les aires continentales. Il est rarement possible de fixer, à quelques millions d'années près, l'extinction des organismes continentaux par rapport à la limite K/T. Aussi le moment de la disparition des derniers dinosaures est-il sujet à controverses. Alors que l'on en connaît plusieurs centaines d'espèces tout au long des temps mésozoïques, les dinosaures ne sont plus représentés que par 12 espèces à l'extrême fin du Crétacé. Dans ces conditions, et contrairement aux affirmations médiatiques, on ne peut guère parler de disparition brutale et d'extinction en masse. Enfin, si les dinosaures ainsi que les ptérosaures, les plésiosaures, les ichthyosaures et les mosasaures ne passent pas la limite, tortues, lézards, serpents, crocodiles et oiseaux la franchissent presque sans dommage.

De cette brève revue, il ressort que les extinctions sont sélectives, s'échelonnent, à l'exception notable des foraminifères planctoniques et peut-être des nannofossiles calcaires, au cours de la fin du Crétacé, qu'elles montrent une accélération à la limite K/T, et que « le message de la biosphère contredit l'idée d'une extinction brutale, instantanée, frappant tout le monde au hasard et au même moment » (Lethiers, 1998 : p. 262).

VI. Le cratère de Chicxulub, les traps du Deccan et la régression à la limite K/T

Après que le Danien, le Montien et le Calcaire pisolithique de Vigny aient été définitivement attribués au Cénozoïque et que la paléogéographie de l'épisode sédimentaire correspondant ait été esquissée (Bignot, 1993), les analyses paléontologiques furent relayées, au cours des années 80, par des investigations sédimentologiques, géophysiques et géochimiques, qui précisèrent la position chronologique de la fameuse limite (fig. 2). Elle est aujourd'hui bien repérée à 65 millions d'années, au cours de la magnétozone (ou chron) 29r. Le stratotype de la limite (GSSP = *Global Boundary Stratotype Section and Point*) est défini à El Kef, en Tunisie.

Restait à comprendre ce qui s'est passé à ce moment si singulier.

Beaucoup de géologues admettent qu'un événement catastrophique est survenu à la limite K/T, et les discussions portent aujourd'hui sur les causes et les modalités de ces « extinctions en masse » brutales (catastrophistes) ou progressives (gradualistes), avec catastrophe d'origine terrestre (volcanistes) ou spatiale (impactistes), l'opposition se manifestant principalement entre volcanistes-gradualistes et impactistes-catastrophistes.

D'un point de vue sédimentologique, la forte concentration en iridium (6 à 70 ppb au lieu de 0,1 ppb, teneur moyenne des sédiments) du mince lit d'argile déposé à la limite K/T en différents endroits, à El Kef, à Stevns Klint au Danemark, à Gubbio en Italie, pour ne citer que ces gisements, accrédite l'hypothèse d'une chute de météorite

formulée par des physiciens américains (Alvarez *et al.*, 1980), et ultérieurement fortifiée par les découvertes, dans la couche à iridium, de quartz choqués, de microtectites, d'une poussière de diamants et de spinelles nickellifères (Robin & Rocchia, 1992).

Mais où localiser l'emplacement du cratère d'impact ? Dans un livre fort attrayant, C. Frankel (1996) s'est attaché à présenter l'enchaînement des faits et des idées qui ont conduit à la découverte du cratère de Chicxulub.

Dès 1985, Jan Smit découvre au Mexique une brèche qu'il estime résulter d'un tsunami d'impact, éloigné de moins de 5000 km. Des tsunamites de ce type sont ensuite reconnues à Cuba et en Haïti par Alan Hildebrandt, qui en évalue l'impact à 1000 km environ. Or, curieusement, dès 1978, un géologue texan, G. Penfield, avait reconnu, d'après des relevés magnétiques, l'existence d'un cratère d'impact enfoui au Yucatan. Avec A. Camargo, il présenta sa découverte à un symposium pétrolier en 1981 à Los Angeles, communication relayée par un journaliste, C. Byar, qui publia ces résultats dans le Houston Chronicle. « Que cet article ait échappé à la vigilance des géologues planétaires et des nombreux chercheurs résidant à Houston, tef de la NASA, est extraordinaire : ceci montre à quel point il existe un cloisonnement de l'information entre les différents secteurs de la science » (Frankel, 1996 : p. 78). Ce n'est que dix ans plus tard que le journaliste, rencontrant à Houston A. R. Hildebrandt à la recherche d'un cratère, lui communiqua les résultats de Penfield et Camargo.

La présence, dans les carottes, de quartz choqués centimétriques et l'interprétation des profils gravimétriques ne laissent aucun doute sur l'origine météoritique du cratère de 180 km de diamètre, enfoui sous 1000 m de sédiments, partie en mer et partie sous la presqu'île du Yucatan, dont le centre se trouve au droit du petit village de Chicxulub, qui lui a donné son nom (fig. 3 et 4). Bien que la collision de la comète de Shoemaker-Lévy avec Jupiter en juillet 1994 ait procuré un modèle réduit de la collision à la limite K/T (le diamètre de la comète n'était que de 2 km), il est difficile d'imaginer les effets catastrophiques de la météorite de Chicxulub. D'après la quantité d'iridium dispersé et les dimensions du cratère, le diamètre de la météorite est estimé à 10 km, sa vitesse de collision à 20 km/s, et son énergie d'impact à 10^{24} joules soit 100 millions de mégatonnes de TNT (10 000 fois la déflagration simultanée de toutes les bombes atomiques existantes). Il en résulta un vent de Mach 1 à 500 km de l'impact, une vague de 100 m de hauteur, un séisme de magnitude 13 sur l'échelle de Richter (ondulation de 20 m aux antipodes), un cratère profond de 30 km et de 180 km de diamètre, soit 200.000 km³ d'éjectats retombant sur toute la Terre.

L'impact eut pour conséquence de porter aussitôt la température de l'atmosphère à 400°C, pendant quelque temps, avant que l'écran de poussière et de suie ne l'obscurcisse en la refroidissant. Le retour progressif de la lumière entraîna pendant plusieurs milliers d'années un effet de serre, dû au dioxyde de carbone et aux oxydes nitriques.

On conçoit que de telles conditions aient pu causer la mort d'un grand nombre d'espèces. Les petits mammifères nocturnes et détritivores, réfugiés dans des terriers, à l'abri de trop importantes variations thermiques, avaient les meilleures chances de survie. En réserve de l'évolution depuis 200 millions d'années, et débarrassés de la concurrence des dinosaures, ils allaient pouvoir s'épanouir au cours du Cénozoïque et aboutir à la lignée humaine.

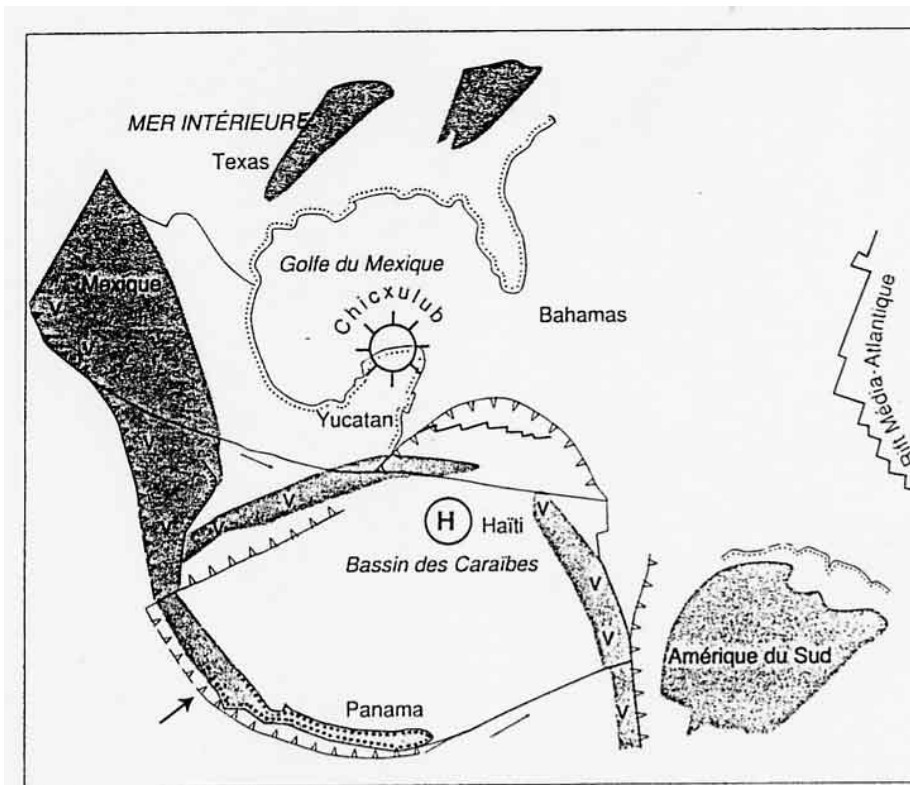


Figure 3 - Le golfe du Mexique à la fin du Crétacé et localisation du cratère de Chicxulub. La mer recouvre les basses plaines américaines et le Yucatan. A l'Est de cette presqu'île le rift médio-atlantique agrandit le golfe, alors que, plus au Sud, Haïti (H) glisse vers l'Est le long de failles latérales. La future Amérique centrale est alors constituée par une mini-plaque océanique. D'après Frankel (1996 : p. 74, fig. 5.5).

Est-ce à dire que la météorite du Chicxulub ait été la seule cause des extinctions de la fin du Crétacé ? Certes pas, car l'événement K/T se situe, comme montré précédemment, dans un continuum évolutif. Cette conception gradualiste conforte les volcanistes. Pour ces derniers, en particulier C. B. Officer & C. L. Drake (1985) aux Etats-Unis et V. Courtillot (1995) en France, la crise biologique serait due à de massives éruptions volcaniques pourvoyeuses d'iridium, comme les trapps du Deccan en Inde, coulées basaltiques épaisses de 1000 à 2000 m sur 500 000 km², soit un volume estimé à 1 million de km³.

Les conséquences pour le monde vivant ont été semblables à celles évoquées par les impactistes, mais la durée de la catastrophe a été beaucoup plus longue : quelques dizaines ou centaines de milliers d'années, au lieu de quelques secondes, avec toutefois des phases paroxysmales (coulée de 1000 km³ en quelques semaines), dont les effets furent comparables à ceux d'un impact. Ces phases éruptives s'étendant sur plusieurs dizaines de milliers d'années expliqueraient la progressivité des disparitions amorcées bien avant la limite K/T.

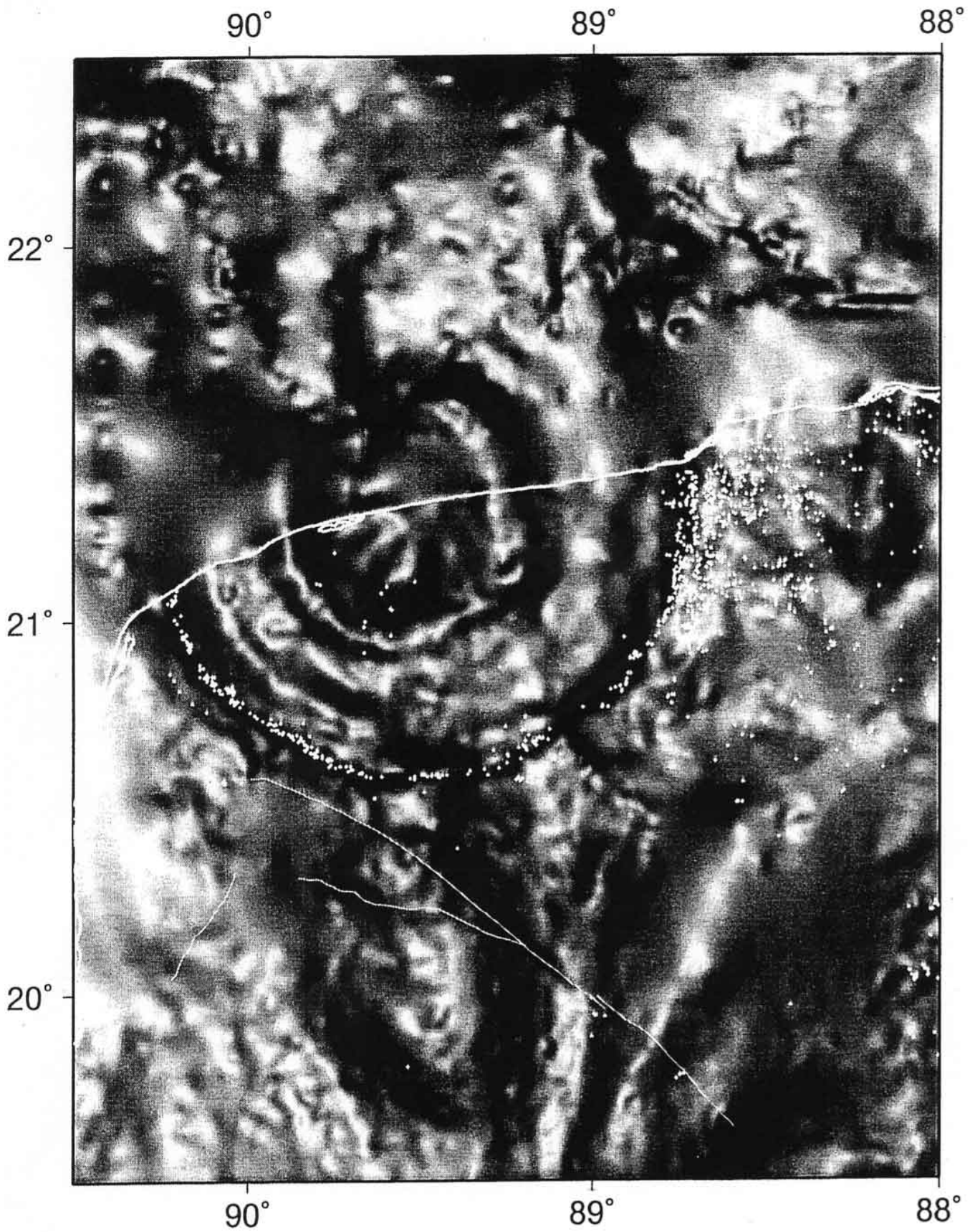


Figure 4 - L'empreinte du cratère de Chicxulub, révélée sous le Yucatan par les anomalies du champ de gravité. La ligne de crête est indiquée par un trait clair. Le motif circulaire foncé du bassin de laves d'impact est entouré d'une couronne plus claire correspondant aux brèches moins denses (tronquée sur le côté nord). Le périmètre de la structure est marqué par un alignement d'entonnoirs d'effondrement remplis d'eau appelés cénotes (points blancs). Le trait fin en « Y » au sud du cratère trahit la faille régionale de Ticul. D'après Hildebrand *et al.*, in Frankel (1996 : p. 94, fig. 5.12).

Enfin un autre scénario, présenté par L. Ginsburg (1964) et repris par J. B. Archibald (1996), lie la crise biologique aux grandes régressions de la fin du Crétacé. A ce moment les mers très étendues ont fait place à des habitats néritiques limités et à d'immenses espaces continentaux. Les écosystèmes marins en ont été fragilisés et beaucoup ont disparu.

VII. En guise de conclusion provisoire

Il convient de rappeler qu'à d'autres moments des temps géologiques des régressions considérables et d'importantes éruptions volcaniques n'ont pas eu d'effet appréciable sur la biosphère. Il en est de même pour plusieurs impacts météoritiques d'amplitude comparable à celui de Chicxulub, et dont nous ne citerons que deux exemples : la structure du Montagnais (Canada oriental) de 45 km de diamètre et dont, selon M.-P. Aubry *et al.* (1990), la formation est « *very close to the early/middle Eocene boundary* » (± 50 Ma), et l'astrolème de Rochechouart, dans le Limousin, de 200 km de diamètre (Tamain, 1986 ; Tamain *et al.*, 1999), daté du début du Mésozoïque.

Toutefois, plusieurs arguments semblent radicalement favorables à l'impact :

- l'énorme quantité d'iridium, de l'ordre de 200 000 à 300 000 tonnes, dispersée en peu de temps sur toute la surface de la Terre, sans commune mesure avec la production volcanique ;
- la présence de quartz choqués et de microtectites jamais rencontrés dans les éjectats volcaniques.

A l'opposé, un argument fort en faveur du volcanisme concerne la coïncidence au cours des temps géologiques des principales extinctions biologiques et des émissions de trapps (fig. 5), au cours desquelles on n'a détecté jusqu'à maintenant (sauf dans ceux du Deccan) ni pic d'iridium ni quartz choqués.

Pour concilier ces diverses hypothèses quelque peu contradictoires, plusieurs auteurs, dont G. Keller *et al.* (1998) et F. Lethiers (1998), proposent d'envisager la conjonction momentanée de plusieurs causes (« *multievent scenario* ») : évolution paléogéographique, sur une longue durée, volcanisme, en un temps plus court, et enfin chute d'une météorite quasi-instantanée.

Au terme de cette longue quête, il est instructif de mettre en évidence les facteurs qui, dans le passé, ont ralenti, faussé, voire paralysé les recherches. Citons, en nous limitant à quelques exemples extraits de la littérature européenne :

- l'argument d'autorité, avec le refus brutal de Munier-Chalmas et de Douvillé de prendre en compte l'interprétation de de Grossouvre (1897) ;
- le poids des idées reçues et de la tradition avec l'attitude de Rasmussen, qui invoque les difficultés d'emploi des ouvrages de référence pour refuser l'attribution du Danien au Cénozoïque dont il était pourtant convaincu (1962) ;
- l'isolement du chercheur et le cloisonnement de l'information, soulignés par l'ignorance ou l'oubli (ou peut-être le mépris) que montrent les stratigraphes des années 1950-60 envers les travaux de Marie qui avaient réglé dès 1937 le problème de l'âge du Calcaire pisolithique ;
- la pression et le rôle réducteur des médias, pour qui la limite K/T se résume en la disparition des dinosaures, et qui ont pour conséquence d'occulter la durée et la sélectivité de la crise biologique de la fin des temps crétacés.

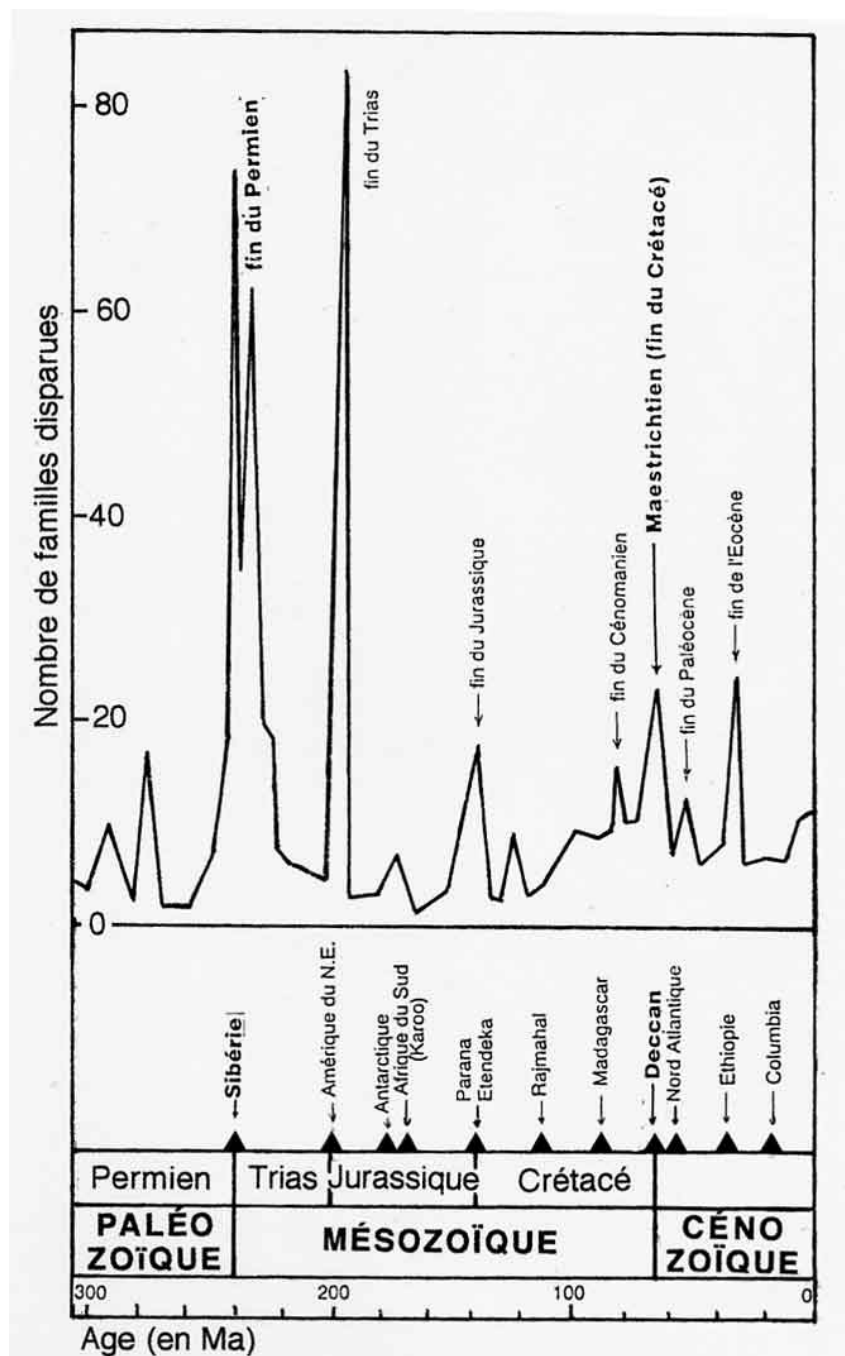


Figure 5 - Corrélation entre les âges d'émission des grands trapps (rectangle inférieur) et les principales extinctions en masse (rectangle supérieur). D'après les données de Courtillot (1995 : p. 167, fig. 16) et de Benton (1995 : p. 55, fig. 6A). Le taux de disparition des familles (tous vivants confondus) relativise la crise K/T qui apparaît limitée par comparaison aux hécatombes de la fin du Permien et de la fin du Trias.

L'exposé de ces facteurs négatifs fait d'autant plus ressortir la perspicacité et l'audace d'Albert de Grossouvre qui, le premier, en 1897, révéla avec une « *netteté extraordinaire* » la crise biologique de la limite K/T, sans toutefois en percer les causes. Un siècle plus tard, la sagesse ne serait-elle pas de reconnaître que, nous aussi, nous n'avons peut-être pas encore d'explication définitive sur ce qui s'est passé à la limite K/T et sur l'origine de la crise biologique qui la caractérise ? Nos investigations ne sont pas terminées et les controverses entamées il y a deux siècles pourraient bien se poursuivre au cours d'un troisième.

Remerciements

A nos collègues MM. J.-P. Bellier, Cl. Guernet et F. Lethiers qui se sont prêtés de bonne grâce aux discussions que nous leur avons imposées ;

à Mme K. von Salis-Perch-Nielsen (Zurich) et M. W. K. Christensen (København) dont l'aide dans notre recherche bibliographique a été déterminante ;

à MM. M. Derruau et C. Frankel qui nous ont obligeamment fourni quelques illustrations ;

et enfin à Mlle M.-A. Lançon qui – comme à son habitude – a su nous dénicher les documents introuvables.

Références

ABILDGAARD S. (1759) - *Beskrivelse over Stevns Klint og dens naturlige Mærkværdigheder*. Copenhagen, p. 1-50.

ABRARD R., FURON R., MARIE P. & SOYER R. (1949) - Sur l'âge du calcaire pisolithique de Vigny. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 228, p. 758-760.

- ALIMEN H., LAPPARENT A.-F. de & LUCAS G. (1948) - Observations nouvelles en faveur de l'âge crétacé du calcaire dit pisolithique de Vigny. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 227, p. 1161-1163.
- ALVAREZ L.W., ALVAREZ W., ASARO F. & MICHEL H.V. (1980) - Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, p. 1095-1108.
- ARCHIBALD J.D. (1996) - K/T Vertebrate extinction and survival: dispelling myths and testing theories. *Séance spéc. Soc. géol. France*, (La limite crétacé-tertiaire : aspects biologiques et géologiques, 2-3 déc. 1996), Résumé (non paginé).
- AUBRY M.-P., GRADSTEIN F.M. & JANSÁ L.F. (1990) - The late early Eocene Montagnais bolide: No impact on biotic diversity. *Micropal.*, 36 (2), p. 164-172.
- BHANDARY A. & COLIN J.-P. (1999) - Ostracodes limniques des sédiments intratrappéens (Maastrichtien terminal-Paléocène basal) de la région d'Anjar (Kachchh, Etat de Gujarat), Inde : Systématique, paléoécologie et affinités paléobiogéographiques. *Rev. Micropal.*, 42 (1), p. 3-20.
- BENTON M.J. (1995) - Diversification and extinction in the history of Life. *Science*, 268, p. 52-58.
- BERGGREN W.A., KENT D.V., AUBRY M.-P. & HARDENBOL J. Ed. (1995) - Geochronology, time scales and global stratigraphic Correlation. *SEPM Spec. Publ.*, 54, p. 129-212.
- BIGNOT G. (1984) - Les Foraminifères benthiques n'ont pas subi de crise majeure à l'extrême fin du Crétacé. In Le passage mésozoïque-cénozoïque ; point de vue paléontologique (A. Poignant éd.). *Bull. Com. Trav. Hist. Sci., C.T.H.S.*, Paris, VI, p. 29-55.
- BIGNOT G. (1993) - The position of the Montian Stage and related facies within the stratigraphic-paleogeographic framework of the NW Europe during the Danian. *Contr. Tert. Quatern. Geol.*, Leyden, 29 (3-4), p. 47-59.
- BIRKELUND T. (1993) - Ammonites from the Maastrichtian White Chalk of Denmark. *Medd. Dansk Geol. Foren*, 40, p. 33-81.
- BOLLI H.M., SAUNDERS J.B. & PERCH-NIELSEN K. (1985) - *Plankton Stratigraphy*. Cambridge Univ. Press, p. 1-1034.
- CHAVAN A. (1948) - L'âge des principaux gisements de Calcaire pisolithique. *Bull. Soc. géol. France*, (5), 18, p. 565-574.
- CHRISTENSEN W.K. (1997) - The Late Cretaceous belemnite family Belemnitellidae: Taxonomy and evolutionary history. *Danmarks Geol. Unders.*, 44, p. 59-88.
- CITA M.-B. (1955) - The Cretaceous-Eocene boundary in Italy. *Proc. 4th World Petroleum Congress*, Roma, I/D, p. 427-413.
- CORNET F.L. & BRIART A. (1865) - Note sur la découverte dans le Hainaut, en-dessous des sables rapportés par Dumont au système landénien, d'un calcaire grossier avec faune tertiaire. *Bull. Acad. roy. Belgique*, (2), 20, p. 757-776.
- COURTILLOT V. (1995) - *La vie en catastrophes*. Fayard, Paris, p. 1-287.
- CUVILLIER J., DALBIEZ F., GLINTZBOECKEL C., LYS M., MAGNÉ J., PEREBASKINE V. & REY M. (1955) - Etudes micropaléontologiques de la limite Crétacé-Tertiaire dans les mers mésogéennes. *Proc. 4th World Petroleum Congress*, Roma, I/D, p. 517-544.
- DAMOTTE R. (1964) - Contribution à l'étude des calcaires montiens du Bassin de Paris : la faune d'Ostracodes. *Bull. Soc. géol. France*, (7), 6, p. 349-356.
- DAMOTTE R. & FEUGUEUR L. (1963) - L'âge du calcaire de Vigny (S.-et-O.) à partir de données paléontologiques nouvelles. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 256, p. 3864-3866.
- DESMIDT P. (1960) - Le Bois des Roches à Vigny. Contribution à l'étude morphologique et descriptive du complexe récifal. *Mém. Soc. géol. France*, n.s., 89, p. 27-43.
- DESOR E. (1847) - Sur le terrain danien, nouvel étage de la craie. *Bull. Soc. géol. France*, (2), 4, p. 179-182.
- DEWALQUE G. (1868) - *Prodrome d'une description géologique de la Belgique*. Bruxelles et Liège, p. 1-442.
- DHONDT A.V. (1989) - Campanian and Maastrichtian inoceramids. A review. *Zitteliana*, 10, p. 689-701.
- DOLLFUS G.F. (1897) - [Observations]. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 26, p. 991.
- DOLLFUS G.F. (1912) - Considérations générales sur le Calcaire pisolithique de Paris. *Bull. Soc. géol. France*, (4), 12, p. 661-674.
- DOUVILLÉ H. (1897) - Observations. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 25, p. 80-81.
- DOUVILLÉ H. (1932) - Notice sur les travaux d'Albert de Grossouvre. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 194 (5), p. 2181-2184.
- FORCHHAMMER G. (1825) - Om de geognostiske Forhold i en Deel af Sjælland og Naboørne. *Kgl. danske Vidensk. Selsk. phys. Skr.*, II, p. 245-280.
- FRANKEL C. (1996) - *La mort des Dinosaures : l'hypothèse cosmique*. *Chronique d'une découverte scientifique*. Masson, Paris, p. 1-272.
- GIGNOUX M. (1960) - *Géologie stratigraphique*. Masson, Paris, 5^e édition, p. 1-736.
- GINSBURG L. (1964) - Les régressions marines et le problème du renouvellement des faunes au cours des temps géologiques. *Bull. Soc. géol. France*, (7), 6, p. 13-22.
- GLAESSNER M.F. (1937) - Planktonforaminiferen aus der Kreide und dem Eozen und ihre stratigraphische Bedeutung. *Stud. Micropal.*, *Moskow Univ. Lab. Paleont.*, 1 (1), p. 27-46.
- GROSSOUVRE A. de (1897) - Sur la limite du Crétacé et du Tertiaire. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 25, p. 57-80.
- GROSSOUVRE A. de (1901) - Recherches sur la Craie supérieure. 1^{re} partie. Stratigraphie générale. *Mém. expl. Carte géol. France*, p. 1-559.
- GROSSOUVRE A. de (1902) - Sur les étages Danien et Montien. *Bull. Soc. géol. France*, (4), 2, p. 326.
- GUERNET C. (1997) - Bioévénements et Ostracodes du Maastrichtien au Rupélien dans les bassins tertiaires du Nord-Ouest de l'Europe. *Sond. Geol. Inst. Univ. Köln*, 114 (Festschrift E. Kempt), p. 217-222.
- HAUG E. (1911) - *Traité de Géologie*. II. Les période géologiques. Fasc. 3, Colin, Paris (Cf. p. 1403-1417).
- HEINBERG C. (1999) - Lower Danian bivalves, Stevns Klint, Denmark: continuity across the K/T boundary. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 154 (1-2), p. 87-106.
- HENNIG A. (1899) - Studier öfver den baltiska Yngre kritans bidningshistoria. III. Den Yngre kritans ålder, översigt öfver dess fauna. *Geol. Fören Stockholm Forhandl.*, 21, p. 133-159.
- KELLER G., LI L., STINNESBECK W. & VICENZI E. (1998) - The K/T mass extinction, Chicxulub and the impact-kill effect. *Bull. Soc. géol. France*, 169 (4), p. 485-491.
- LAMBERT J. (1907) - Notes sur les Echinides du Calcaire pisolithique du Bassin de Paris. *C. R. Ass. fr. Avanc. Sciences*, Reims, p. 281-292.
- LAMBERT J. (1920) - Sur un Echinide nouveau du Montien des environs de Paris. *Bull. Soc. géol. France*, (4), 20, p. 246-250.
- LAPPARENT A. de (1906) - *Traité de Géologie*. Masson, Paris, 5^e édition, (Cf. p. 1469).
- Légende générale de la carte géologique détaillée de la Belgique (1929) - *Ann. Mines Belgique*, 30, p. 39-80.
- LEMOINE P. (1911) - Sur la nature récifale du Calcaire pisolithique de Vigny et de Montainville. *C. R. somm. Soc. géol. France*, 1911, p. 96-97.
- LEMOINE P. (1937) - L'âge et les conditions de dépôt du Calcaire pisolithique. *Bull. Soc. géol. France*, (5), 7, p. 283-285.
- LETHIERS F. (1998) - *Evolution de la biosphère et événements géologiques*. Gordon & Breach, Paris, p. 1-321.

- LERICHE M. (1937) - Les rapports entre les formations tertiaires du Bassin belge et du Bassin de Paris. *Bull. Soc. belge Géol.*, 47 (C. R. session extraordinaire de la Soc. belge Géologie dans le N et l'E de l'Ile-de-France), p. 549-655.
- LYELL Ch. (1838) - Sur les terrains crétacés et tertiaires du Danemark. *Bull. Soc. géol. France*, (1), 9 (1837-38), p. 292-293.
- MACLEOD K.G. & ORR W.N. (1993) - The taphonomy of Maastrichtian Inoceramids in the Basque region of France and Spain and the pattern of their decline and disappearance. *Paleobiology*, 19 (2), p. 235-252.
- MARIE P. (1937) - Sur la faune de Foraminifères du Calcaire pisolithique du Bassin de Paris. *Bull. Soc. géol. France*, (5), 7, p. 289-294.
- MARLIERE R. (1958) - La subsidence du récif campanien de Vigny. *Bull. Soc. géol. France*, (6), 8, p. 751-759.
- MOROZOVA V.G. (1946) - [The boundary between the Cretaceous and Tertiary in the light of the study of Foraminifers]. *Doklady Akad. Nauk USSR*, n.s., 54, p. 153-155.
- MUNIER-CHALMAS E. (1897a) - Observations. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 25, p. 81.
- MUNIER-CHALMAS E. (1897b) - Note préliminaire sur les assises montiennes du Bassin de Paris. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 25, p. 82-90.
- MUNIER-CHALMAS E. & de LAPPARENT A. (1893) - Note sur la nomenclature des terrains sédimentaires. *Bull. Soc. géol. France*, (3), 21, p. 438-491.
- NIELSEN K.B. (1919) - En Hydrocoralfauna fra Faxø og Bemærkninger om Danien's geologiske Stilling. *Danmarks Geol. Unders.*, (4), 1 (10).
- NIELSEN K.B. (1937) - Faunaen i ældre Danum ved Korporalskroen. *Medd. Dansk Geol. Foren.*, 9 (2), p. 117-126.
- ODUM H. (1926) - Studier over Daniet i Jylland og paa Fyn. *Danmarks Geol. Unders.*, (2), 45, p. 1-306.
- OFFICER C.B. & DRAKE C.L. (1985) - Terminal Cretaceous environmental events. *Science*, 227, p. 1161-1167.
- ORBIGNY Ch. d' (1836) - Note sur le terrain nouvellement découvert à Meudon. *Bull. Soc. géol. France*, (1), 7, p. 280-291.
- PHILIP J. (1998) - Biostratigraphie et paléobiogéographie des Rudistes ; évolution des concepts et progrès récents. *Bull. Soc. géol. France*, 169, p. 689-708.
- POMEROL Ch. & FEUGUEUR L. (1986) - Bassin de Paris, Guide géologique régional. Masson, Paris, 3^e éd., p. 1-122. (Cf. p. 89-91).
- RASMUSSEN H.W. (1964) - Les affinités du Tuffeau de Ciplly en Belgique et du post-Maastrichtien. « Me » des Pays-Bas avec le Danien. *Mém. BRGM*, 28 (Coll. Paléogène 1962), p. 865-872.
- RAVN J.P.J. (1903) - [Recherches sur la stratigraphie du Crétacé au Danemark]. *Mém. Acad. roy. Sci. Let. Danemark*, 6, Sci., 11/2-4-6.
- RAVN J.P.J. (1925) - Sur le placement géologique du Danien. *Danmarks Geol. Unders.*, (2), 48, p. 1-48.
- ROBIN E. & ROCCIA R. (1992) - Ni-rich spinel at the Cretaceous-Tertiary boundary of El-Kef, Tunisia. *Bull. Soc. géol. France*, 169, p. 365-372.
- ROSENKRANTZ A. (1920) - En ny kopenhavnsk Localitet for forsteingsførende Paleocæn. *Medd. Dansk Geol. Foren.*, 5 (20), p. 3-10.
- ROSENKRANTZ A. (1960) - Danian Mollusca from Denmark. *Int. Geol. Congr.*, 21st Session, Copenhagen, 5, (5), p. 193-198.
- RUTOT A. & van den BROECK E. (1886) - Note sur l'âge tertiaire du tuffeau de Ciplly. *Ann. Soc. Malacol. belge*, 20, p. 108-118.
- SORGENFREI Th. (1957) - Danian limestone group. *In Lexique Stratigraphique International*. Vol. 1 Europe, Fasc. 2d Danemark. CNRS, Paris (Cf. p. 9-12).
- SOYER R. (1943) - Recherches sur l'extension du Montien dans le Bassin de Paris. *Bull. Serv. Carte géol. France*, 213 (44), p. 321-426.
- TAMAIN G. (1986) - L'astrolème de Rochechouart (Fr.) : la plus grande structure d'impact météoritique reconnue à la surface de la terre, vue du satellite Landsat 2. *C. R. 111^e Congr. Soc. Sav.*, Poitiers, 1, p. 173-185.
- TAMAIN G., FRANKE R. & DEVAUX D. (1999) - La plus grande météorite du Monde. *Sciences et Avenir*, juin 1999, p. 132-134.
- YANSHIN A.L. (1960) - Stratigraphic position of the Danian stage and the problem of the Cretaceous-Paleocene boundary. *Int. Geol. Congr.*, 21st Session, Copenhagen, 5, (5), p. 210-216.

1) Albert de Grossouvre (1849-1932), polytechnicien résidant à Bourges, passionné de Géologie, aussi bon stratigraphe que paléontologiste, a toujours travaillé en « amateur ». Critiqué par les « maîtres » parisiens, loin de toute université, il vit cependant ses travaux officiellement reconnus puisqu'il devint correspondant de l'Institut (Douvillé 1932).