

Janvier 2024

**HORS  
SÉRIE**  
PALÉONTOLOGIE

311

**SCIENCE & VIE**

# Dinosaures

**MINUTE PAR MINUTE**

Le nouveau récit  
de leur extinction

**LE TUEUR N'A PAS FRAPPÉ SEUL**

L'astéroïde s'écrase sur un monde déjà fragilisé par une crise climatique

**APRÈS L'IMPACT, LE CHAOS!**

Mammifères, oiseaux, plantes à fleurs... Pourquoi vont-ils survivre ?

REWORLD  
MEDIA

BEL: 6,10€ - ESP: 6,20€ - GR: 6,20€ - DOM S: 6,60€ - DOM A: 7,90€ - ITA: 16,20€ - LUX: 6,10€ - PORT CONT: 6,20€  
CAN: 8,95\$ CAN - MAR: 63DH - TOM S: 850CFP - TOM A: 1600CFP - CH: 9 F\$ - TUN: 13DTU

L 19057 - 311 H - F: 5,95 € - RD



S.E.P.M.  
TOP  
ventes

# SCIENCE & VIE

Depuis 1913

N° 1276 JANVIER 2024

**LA FRANCE REGORGE  
DE MÉTAUX RARES!**  
FAUT-IL CREUSER DES MINES ?

**ALZHEIMER**  
DES TRAITEMENTS  
ARRIVENT

ET SOUDAIN...

# LA VIE!

COMMENT L'INERTE  
S'EST ANIMÉ

NOTRE SÉRIE

**MISSION 24**  
CONSTRUIRE  
LE PLUS GRAND  
DES TÉLESCOPES

**PHYSIQUE**  
ON A MESURÉ L'UNE  
DES QUATRE FORCES  
DE LA NATURE

**ÉVOLUTION**  
AUX ORIGINES DE  
L'HOMOSEXUALITÉ  
ANIMALE

**En vente actuellement**  
chez votre marchand de journaux  
et sur [www.kiosquemag.com/boutique](http://www.kiosquemag.com/boutique)

**Kiosque  
Mag**

Disponible sur  
[kiosquemag.com](http://kiosquemag.com)

VENTE ET ABONNEMENT





## La chute du T-rex

Il incarne la tragédie qui frappa notre planète voici 66 millions d'années : le *Tyrannosaurus rex*. N'est-il pas le "lézard tyran roi", ce seigneur imposant sa loi sauvage avant d'être carbonisé par l'armageddon dinosaurien ? Comment ne pas y voir une parabole, préfiguration de ce qui attend l'espèce humaine si elle ne met pas un terme à la guerre, au réchauffement climatique, etc. ? Pour autant, cet aïeul symbolique ne sort pas de nulle part : vivant, l'aire de répartition du *T-rex* épouse les contours de l'Amérique du Nord. Mort, il est découvert en 1874 dans le Colorado et rendu célèbre par la magie d'Hollywood. Un mythe *made in USA*, donc. Icône biblique d'une nation dont 41 % des membres estimaient encore, en 2015, que dinosaures et humains ont coexisté dans un lointain passé (sondage YouGov). Mais que s'est-il vraiment passé à la fin du Crétacé ? Un site paléontologique nous en donne un aperçu saisissant : Hell Creek, dans le Dakota du Nord. Là, les dinosaures connurent vraiment l'enfer. Dans ce numéro, nous le détaillons minute par minute. La crise du K-Pg (Crétacé-Paléogène) fut-elle la même partout sur la planète ? Les paléontologues sont plus nuancés : sorti des Amériques, pas de géhenne brûlante, mais une famine qui a privilégié, si l'on peut dire, les petits mangeurs. Une nouvelle défrayait récemment la chronique scientifique : celle de la découverte en Patagonie d'un cimetière d'hadrosaures contemporain de la catastrophe. Parmi ces restes, une mâchoire de regitherid, un mammifère ressemblant à un écureuil. Un rescapé ? Pas sûr ! 90 % des espèces de mammifères disparurent au K-Pg. Il s'en est donc fallu d'un poil pour que nos ancêtres connaissent le même sort que le *T-rex*. On a longtemps cru qu'ils devaient leur survie à leur intelligence, or, c'est faux : s'ils survécurent, c'est parce que leur minuscule cerveau n'avait pas besoin de beaucoup d'énergie ! Le *T-rex*, lui, était plutôt intelligent. Alors, achevons la métaphore biblique : voilà 66 millions d'années, heureux les simples d'esprit, car la postérité (et non, pour cette fois, le Royaume des cieux) est à eux.

**Olivier Carpentier**



**ÉDITEUR**  
 Reworld Media Magazines SAS  
 Siège social: 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux  
 Directeur de la publication: Gautier Normand  
 Actionnaire: Président Reworld Media France  
 (NCS Nanterre 477 494 371)  
 Tél. accueil: 01 41 33 55 00  
 www.science-et-vie.com  
 SERVICE LECTEURS: sev.lecteurs@reworldmedia.com

**RÉDACTION**  
 DIRECTRICE DE LA RÉDACTION: Karine Zagaroli  
 DIRECTEUR ADJOINT DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE:  
 Philippe Bourbellon  
 ASSISTANTE DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE ET SCIENCE & VIE  
 HORS-SÉRIE: Christelle Borelli

**RÉALISATION SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE**

**COM' Presse:** 6 rue Tarnac, 47220 Astaffort. Tél. 05 53 48 17 60  
**RÉDACTEUR EN CHEF:** Olivier Carpentier  
**RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE:** Amanda Schrepf  
**DIRECTEUR ARTISTIQUE:** Emillien Guillon  
**RÉDACTRICE PHOTO:** Géraldine Lafont  
**SECRÉTAIRES DE RÉDACTION:** Christel Baridon, Amélie Borgne,  
 Nicolas Chrétien, Gaëlle Combacon, Fabienne Corona,  
 Lita Doval, Jérôme Le Dantec, Vincent Ourso, Marion Pires,  
 Charlene Torres, Olivier Vignancour  
**ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO:** Kheira Bettayeb, Armelle  
 Camelin, Mathias Challot, Adrien Denèle, Coralie Hancock,  
 Pascale-Emmanuelle Lapemat-Guilhaumon, Hugo Leroux,  
 Lise Gougis, Héloïse Rambert

**DIRECTION-ÉDITION**  
 ÉDITEUR: Germain Périnet  
 ÉDITRICE ADJOINTE: Charlotte Mignerey

**PUBLICITÉ**  
 DIRECTRICE GÉNÉRALE: Élodie Breteau-Fontelles  
 DIRECTRICE DU PÔLE COMMERCIAL: Catherine Mireux (19 02),  
 Anne Lefeuvre  
 PLANNING: Angélique Consoli (53 52),  
 Stéphanie Guillard (53 50)  
 RESPONSABLE TRAFIC: Catherine Leblanc (43 86)

**MARKETING / INTERNATIONAL**  
 RESPONSABLE MARKETING: Cécile Doul

**ABONNEMENTS ET DIFFUSION**  
 DIRECTRICE MARKETING CLIENT: Catherine Grimaud  
 CHEF DE GROUPE: Davina Champaigne  
 CHEF DE PRODUIT: Karine William  
 RESPONSABLE VENTES MARCHÉ: Siham Daassa  
 RESPONSABLE DIFFUSION: Isabelle Fargier

**RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS**  
 Une question sur votre abonnement ? Appelez-nous au 01 46 48 48 96  
 (de 8 h à 20 h, du lundi au samedi, prix d'un appel local).  
 Ou rendez-vous sur [www.serviceabomag.fr](http://www.serviceabomag.fr), dans votre espace client  
 Vous voulez vous abonner ? Rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)  
 Par courrier: **Service abonnement Science & Vie,**  
 59898 LILLE Cedex 9

Pour les États-Unis et le Canada: Express Mag, 8155 rue Larrey,  
 Anjou (Québec), H1J 2L5. Tél. 1 800 363-1310 (français)  
 et 1 877 363-1310 (anglais); fax (514) 355-3332.  
 Pour la Suisse: Edigroup Suisse, 022 860 84 50  
 reworld@edigroup.ch  
 Pour la Belgique: Edigroup Belgique, 070 233 304  
 reworld@edigroup.be  
 Autres pays: nous consulter.  
 Commande d'anciens numéros et de reliures au 01 46 48 48 83

**FABRICATION**  
 DIRECTION DES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES: Bruno Matilla

**PRÉPRESSE**  
 RESPONSABLE DE SERVICE: Sylvain Boularand  
 Imprimeur: Maury - France  
 N° ISSN: 1966-9437  
 N° de commission paritaire: 1020 K 79977

Dépôt légal: décembre 2023



AFFICHAGE ENVIRONNEMENTAL	
Origine du papier	Finlande
Taux de fibres recyclées	0%
Certification	PEFC
Impact sur l'eau	Ptot 0,006 kg/tonne



## AVANT-PROPOS

### 6 “Chicxulub bouleverse le cours de l'évolution”

Le paléontologue Éric Buffetaut fait le point sur les dernières connaissances qui permettent d'expliquer la fin des dinosaures, et les incertitudes qui persistent.

## LE CONTEXTE

### 16 Un “paradis” pas si tranquille

Dans ce monde chaud sans calotte glaciaire, la tectonique des plaques est en train de redistribuer les continents et changer le climat.

### 20 15 espèces qui dominent au Crétacé

Les chercheurs découvrent chaque année une vingtaine de dinosaures. En voici quelques-uns... mais pas que !

### 28 Les oiseaux, ces dinos réchappés de l'extinction

Des avancées technologiques et de nouvelles découvertes apportent des réponses sur l'évolution des dinosaures aviens.

### 32 “Et s'ils avaient été voués à disparaître ?”

Deux thèses continuent à s'affronter : l'une défendant l'idée d'un déclin avancé des dinosaures bien avant Chicxulub, l'autre pariant sur leur fin brutale dont l'impact est le principal responsable.

### 38 Pendant ce temps, un géocroiseur fonce vers la Terre...

D'où venait l'astéroïde qui a frappé la planète il y a 66 millions d'années ? Et était-ce bien une météorite ?

### 40 Chicxulub, le scénario du pire

Des chercheurs ont modélisé la profondeur du cratère et le tsunami qui a suivi l'impact de l'astéroïde dans la péninsule du Yucatán.

### 46 À quand le prochain géocroiseur ?

Pleins feux sur la mission Dart dont l'objectif premier est de dévier tout géocroiseur qui menacerait la Terre.

Recevez Science & Vie et ses Hors-Série  
Votre bulletin d'abonnement se trouve en p. 45. Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par internet sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)





## LA CATASTROPHE

### 52 “À Tanis, nous décodons ce qui a mis fin au Crétacé”

Le paléontologue Robert DePalma travaille sur ce site, au Dakota du Nord, depuis 2012. La richesse et l'amoncellement de fossiles intacts sont un instantané de la catastrophe K-Pg.

### 58 Le récit de l'apocalypse minute par minute

Le cratère, le séisme, la pluie de feu, la tempête, les tsunamis... Les dernières découvertes racontent l'enfer sur Terre.

EN COUVERTURE

## UNE NOUVELLE ÈRE

### 74 Hiver d'impact : la terre plongée dans les ténèbres

L'ère du Paléocène naît dans un nuage de suie, de soufre et de poussière, fatal pour les dinosaures survivants.

### 80 Les volcans du Deccan, l'autre coupable idéal

Leur intense activité depuis déjà des milliers d'années les a longtemps désignés comme seuls responsables de l'extinction.

### 82 Pourquoi les mammifères ont-ils survécu ?

90 % d'entre eux ont trépassé après l'impact. Leur petite taille et une bonne dose de chance ont permis à un petit nombre de résister et d'évoluer.

### 88 Plantes à fleurs : Chicxulub, connais pas !

Elles ont une phénoménale capacité de survivance et, parmi elles, les angiospermes dominent.



## AUJOURD'HUI

### 94 “Les dinosaures font écho à l'humain”

La dessinatrice scientifique Marion Montaigne et le psychologue Pascal Hachet se livrent à l'analyse de la fascination qu'exercent les dinosaures encore aujourd'hui.

### 102 Et s'ils n'avaient pas disparu ?

Des chercheurs s'interrogent sur le devenir de ces “terribles lézards” s'ils n'avaient pas été éteints... et, par ricochet, sur notre propre évolution.

### 106 Questions / Réponses

### 112 C'est écrit / C'est dit

### 114 C'était écrit

ÉRIC BUFFETAUT

# “Chicxulub boule de l'évolution”

Le paléontologue Éric Buffetaut, directeur de recherche émérite au CNRS et créateur de Dinosauria, le musée des dinosaures d'Espérasa dans l'Aude, fait le point sur les dernières études et (in)certitudes qui entourent la fin du règne des dinosaures. PAR ARMELLE CAMELIN

**SVHS :** *En 1980, la théorie d'un impact météoritique cataclysmique est proposée pour expliquer l'extinction de masse du Crétacé-Paléogène à l'origine de la disparition des dinosaures. 43 ans plus tard, que sait-on de cet événement ? De quoi sommes-nous absolument certains ?*

**Éric Buffetaut :** L'impact météoritique est une certitude. Tous les indices permettent de conclure qu'une météorite s'est bien écrasée sur la Terre à la fin du Crétacé. On ne trouve guère plus de personnes qui disent que l'impact n'a pas eu lieu : les preuves sont très convaincantes et,

dans un certain sens, indiscutables. Ce n'était pas le cas il y a 43 ans. Cette théorie était alors révolutionnaire et très surprenante pour beaucoup de membres de la communauté scientifique.

**SVHS :** *Quels sont les premiers indices qui ont amené à formuler cette hypothèse ?*

**E.B. :** En premier lieu, c'est la découverte un peu fortuite, en 1980, d'un pic d'iridium considérable juste à la limite entre le Crétacé et le Paléogène. Au départ, le



# verse le cours





pic était peut-être dû à l'impact d'une grosse météorite.

**SVHS:** *Quelles sont les autres preuves de ce cataclysme ?*

**E.B.:** On a observé, dans cette même fameuse couche d'argile qui contient de l'iridium, des grains de quartz choqués. Ces fractures très caractéristiques dans des grains de minéraux ont été provoquées par des pressions extrêmement élevées à la limite Crétacé-Paléogène. Ce genre de fracturation a deux causes connues : les impacts de météorites ou les explosions nucléaires. Comme les explosions nucléaires à la fin du Crétacé sont relativement improbables, on a conclu que ces grains choqués étaient aussi des traces de l'impact météoritique. Le troisième indice – mis en évidence par des chercheurs français – est la présence dans cette même couche d'argile de minéraux très particuliers :

géologue américain Walter Alvarez, associé au physicien Luis Alvarez, son père, et aux chimistes Frank Asaro et Helen W. Michel, étudiait la teneur en iridium dans les roches autour de la limite Crétacé-Paléogène pour essayer de mesurer le taux de sédimentation. Ils

partaient du principe que l'iridium était d'origine extraterrestre et qu'il y en avait un flux constant. Or, ils se sont aperçus que le flux n'était pas du tout constant et ont observé un pic à la limite Crétacé-Paléogène. Ça a été le déclencheur de l'hypothèse proposée en 1980 : ce

“ *L'énergie déployée par l'impact correspond à 5 milliards de fois celle libérée à Hiroshima* ”



La présence de cristaux de magnétite dans la couche d'argile correspondant à l'extrême fin du Crétacé plaide en faveur de la thèse de l'impact d'une météorite.

des magnétites nickélicifères. Ils se forment lorsqu'une météorite traverse l'atmosphère et que la surface de cette météorite est soumise à des températures extrêmement élevées...

**SVHS :** *Le fameux cratère de Chicxulub est ensuite découvert...*

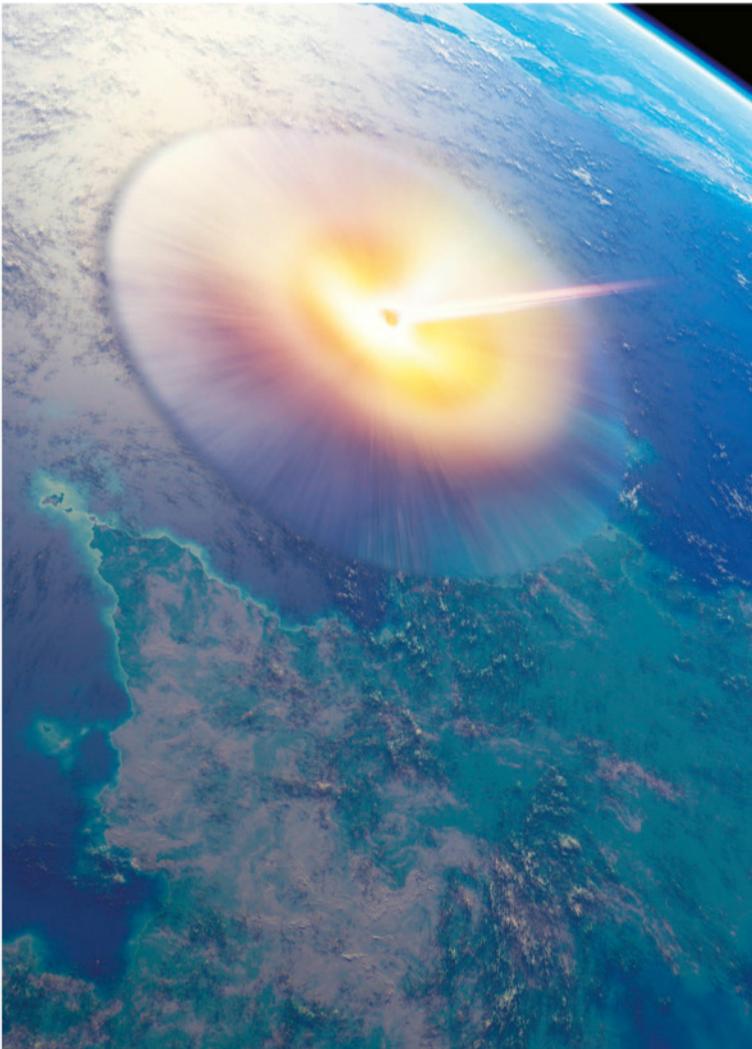
**E.B. :** Oui, ces trois premiers indices concernent

les conséquences de l'impact plutôt que la trace de l'impact lui-même. Dans les années 1970, on avait trouvé des vestiges de ce cratère lors de sondages pétroliers faits au Mexique, dans la péninsule du Yucatán, mais cela n'avait pas été interprété immédiatement comme les traces d'un cratère d'impact. C'est plus tard, en examinant les anomalies de la gravité dans cette région, qu'on s'est aperçu de la présence d'une structure enfouie – qui ne se voit pas dans la topographie

actuelle – sous des épaisseurs assez importantes de sédiments. Cette structure correspondait à celle d'un très grand cratère d'environ 200 km de diamètre. Celui-ci a été daté : il s'est formé il y a 66 millions d'années. Il est donc le candidat idéal pour l'impact météoritique de la limite Crétacé-Paléogène.

**SVHS :** *Comment l'impact d'une météorite de plus de 10 km de diamètre a-t-il pu avoir des conséquences sur toute la planète ?*

**E.B. :** Les conséquences ne sont pas les mêmes à proximité du point d'impact, au Mexique, et de l'autre côté de la Terre. On estime qu'il y a eu une destruction totale des êtres vivants dans un rayon de plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres, à cause de l'énergie déployée par l'impact. Cette énergie correspond à 5 milliards de fois celle libérée par la bombe de Hiroshima. La violence de l'impact a pulvérisé et injecté de la matière dans l'atmosphère : un nuage de poussière s'est développé tout autour de la Terre. En retombant à la surface du globe, ce nuage de poussière a formé la couche d'argile riche en iridium, quartz choqué et magnétites dont on parlait plus tôt. On sait que ce phénomène est mondial, car, où que ce soit sur Terre, quand on prélève une carotte géologique et que la succession des roches à la limite Crétacé-Paléogène est conservée de façon assez complète, on retrouve cette couche enrichie en iridium.





**SVHS: Avant qu'il ne retombe, ce nuage de poussière était-il opaque ?**

**E.B. :** Oui ! Il s'agissait d'un nuage suffisamment opaque pour bloquer la lumière du soleil. Les conséquences à l'échelle de la planète sont dramatiques. Pour simplifier en quelques mots : le manque de lumière provoque un arrêt ou une baisse très importante de la photosynthèse des plantes, et donc un dépérissement de la végétation, qui, en cascade, donne lieu à des extinctions chez les animaux qui n'ont plus de nourriture.

**SVHS: Depuis 2012, les paléontologues s'affairent sur le site de Tanis, découvert dans le Dakota du Nord, près de la formation de Hell Creek, à 3 000 km au nord de l'impact météoritique. Cet endroit est souvent comparé à un Pompéi des dinosaures : enseveli dans les heures qui ont suivi l'impact, il a laissé des traces de l'événement cataclysmique. Que pensez-vous de cette découverte ?**

**E.B. :** C'est une découverte majeure dont on commence à peine à apprécier la portée. Tanis est d'un très grand

intérêt ! Avoir un site où ont été enregistrés les effets de l'impact météoritique très peu de temps après qu'il s'est produit est une chance extraordinaire. Cela permet de tester les hypothèses proposées sur les conséquences immédiates de l'impact à une certaine distance du point de la collision et dans un environnement continental différent de celui de Chicxulub. Ce qui a été trouvé sur le site est en accord avec l'idée d'un événement cataclysmique lié directement à l'impact météoritique. Par exemple, la découverte de sphérules [billes de roche chauffées à blanc retrouvées dans les branchies de poissons à spatule fossilisés, indiquant qu'ils étaient vivants au moment de l'impact, NDLR]. Cela devrait balayer les hésitations de ceux qui

“ Pourquoi cette extinction est-elle sélective ? Les dinosaures non-aviens disparaissent, mais pas les oiseaux ni les mammifères ”



Le géophysicien Sean Gulick (à g.) lors d'une campagne d'étude du cratère immergé de Chicxulub, en 2016, menée à bord de la plateforme scientifique offshore L/B Myrtle.

persistent à douter du rôle de l'impact météoritique dans l'extinction de masse de la fin du Crétacé.

**SVHS :** *Que nous reste-t-il à comprendre de cette extinction ?*

**E.B. :** Entre autres, pourquoi certains groupes d'animaux ont disparu et d'autres non. Pourquoi cette extinction est-elle sélective ? Les

dinosaures non-aviens – qui ne sont pas devenus des oiseaux – disparaissent, mais d'autres groupes survivent : les oiseaux, les mammifères, un certain nombre de reptiles comme les crocodiles, les tortues ou les lézards, et toutes sortes d'invertébrés qui vivent aussi bien dans les mers que dans les rivières ou sur les continents. Dans les eaux douces, les taux d'extinction sont moins élevés : pourquoi ? On a quelques pistes d'explication qui restent à préciser.

**SVHS :** *Que supposons-nous ?*

**E.B. :** Dans l'océan, on trouve des quantités énormes de plancton dans les sédiments. On constate qu'il a beaucoup souffert lors de l'extinction Crétacé-Paléogène. On peut imaginer que toutes les chaînes alimentaires qui ont pour point de départ le phytoplancton souffrent en cascade – les invertébrés marins, les poissons, puis les gros animaux comme les grands reptiles, mosa-saures ou plésiosaures. Dans le milieu continental, le moment où l'iridium arrive dans les sédiments correspond à une grande crise du monde végétal, avec la disparition quasi totale des plantes à fleurs. On peut donc imaginer que les herbivores qui dépendent de ces plantes, puis les carnivores qui dépendent des herbivores ont disparu faute de nourriture. En eau douce, la chaîne alimentaire est nettement moins affectée que dans l'océan ou sur la terre ferme. Là, au départ, il n'y a ni plancton, ni plante, mais plutôt de la matière organique en suspension dans l'eau. Elle est absorbée par de petits animaux, par exemple des vers, qui ensuite sont mangés par des poissons, lesquels nourrissent les tortues, les crocodiles, et ainsi de suite. Ce type de piste nous permet d'essayer de comprendre la sélectivité des extinctions...

**SVHS :** *Certains scientifiques évoquent l'idée que l'impact météoritique a été un coup de grâce pour des*

**dinosaures déjà en déclin. Une récente étude indique que le taux d'apparition des espèces de dinosaures était en diminution. Une autre que certains dinosaures avaient perdu la capacité de thermoréguler leur organisme. Étaient-ils déjà à l'agonie avant la crise ?**

**E.B. :** Le règne des dinosaures a connu des hauts et des bas. Ceux qui vivaient à la fin du Trias, quand le groupe est apparu, n'étaient pas les mêmes que ceux qui vivaient à la fin du Crétacé. Dans un environnement ni stable ni constant, ces animaux ont évolué sans cesse. La géographie terrestre a connu des changements, tout comme le niveau des mers et le climat. Cela étant dit, d'éventuelles modifications dans les faunes de dinosaures à la période précédant leur disparition n'indiquent pas nécessairement qu'ils étaient condamnés à disparaître. Je crois qu'on mélange un peu deux choses. Certains scientifiques, obnubilés par la disparition des dinosaures, essaient de trouver une tendance de fond dans leur évolution qui les amènerait vers le déclin. Or, juste avant leur disparition, les dinosaures sont présents dans le monde entier et ils sont divers et variés. Ceux qui vivaient en Europe n'ont rien à voir avec ceux qu'on trouve à la même époque en Amérique du Nord. Quand on estime la diversité des dinosaures, on se heurte à des biais : tout dépend des sites paléontologiques qu'on a à notre



disposition. Ce n'est pas parce qu'on observe quelque chose dans une petite partie du monde que ça vaut pour toute la planète. Il y a un danger à généraliser à l'ensemble de la planète un éventuel déclin dans une partie du monde. Je reste donc sceptique quant à cette idée du coup de grâce : celle-ci impliquerait que les

faunes de dinosaures étaient déjà en mauvais état à la fin du Crétacé, or ce n'est pas ce que nous disent les fossiles.

**SVHS :** *Après la crise, la végétation revient. D'abord, ce sont les fougères. Sait-on combien de temps cela a pris ?*

**E.B. :** C'est une très grande question, car elle

“ Il y a un danger à généraliser un éventuel déclin des dinosaures dans une partie du monde à l'ensemble de la planète ”



Walter Alvarez, découvreur de la couche d'argile correspondant à la limite Crétacé-Paléogène, et la géologue Isabella Premoli-Silva examinent la trace fossile d'un glissement de terrain vieux de 66 millions d'années.

conditionne tout le reste. Si cette crise de la photosynthèse et de la production végétale avait duré des milliers d'années, rien n'aurait survécu. Il faut donc envisager un événement assez court et ça, ça gêne les paléontologues qui ont l'habitude de raisonner en termes de millions ou de centaines de milliers d'années. Avec les technologies de datation dont nous disposons aujourd'hui, il est très difficile de proposer une chronologie précise des

événements d'il y a 66 millions d'années, mais on est obligés de supposer que la crise de la photosynthèse a duré quelques mois ou quelques années.

**SVHS : Quelles branches de la paléontologie nous donnent le plus d'indices sur les événements de la limite Crétacé-Paléogène ?**

**E.B. :** À certains égards, la micropaléontologie joue un rôle de premier plan dans la compréhension des événements. Les dinosaures sont les fossiles les plus spectaculaires, mais pas les plus utiles. L'étude des microfossiles que l'on trouve dans les sédiments marins, ainsi que celle des spores et grains de pollen, nous a probablement plus apporté sur la compréhension du phénomène que les dinosaures eux-mêmes. Quand on fait des carottes de sondage dans et autour du point d'impact de la météorite, ce ne sont pas les restes de dinosaures qu'on va chercher, mais des microfossiles. Évidemment, ça n'empêche pas l'étude des gros animaux pour comprendre le phénomène biologique dans son ensemble. Ces études sont complémentaires.

**SVHS : Sans cette météorite, que serait-il arrivé ?**

**E.B. :** Depuis toujours, certains paléontologues s'amusent à spéculer sur ce que les dinosaures seraient devenus si leur développement n'avait pas été arrêté à la fin du Crétacé. Il est clair que cet impact a changé

le cours de l'évolution des êtres vivants d'une façon considérable. Prenons le cas des mammifères : ils sont apparus à peu près en même temps que les dinosaures. Jusqu'à la fin du Crétacé, les mammifères évoluent en parallèle avec eux. Ils se transforment, ils se diversifient, mais ils conservent une taille modérée – pas plus gros qu'un chien. Après la disparition des dinosaures, ils se diversifient énormément et s'adaptent à toutes sortes de milieux. La disparition des dinosaures a ouvert aux mammifères de nouvelles possibilités évolutives qu'ils n'avaient pas auparavant, car les niches écologiques étaient déjà occupées.

**SVHS : Quels sont les risques de croiser à nouveau une météorite de cette taille ?**

**E.B. :** De gros objets, des astéroïdes, croisent l'orbite de la Terre périodiquement. Il suffit d'observer la surface de la Lune, criblée de cratères d'impact, pour comprendre que toutes les planètes du système solaire sont bombardées de météorites en permanence. Notre atmosphère les détruit jusqu'à une certaine taille. Après la découverte de Chicxulub, la recherche de cratère s'est intensifiée et on en a trouvé d'autres ! Certains sont encore plus grands, mais pour des périodes très lointaines, le monde vivant n'était alors pas le même. Toutefois, cela prouve que même si la fréquence de ces impacts n'est pas énorme, le risque existe. ■



# LE CONTEXTE



# Un “paradis” pas si tranquille

Des tropiques surchauffés,  
l'Amérique qui se sépare de  
l'Afrique, l'Europe sous les eaux...  
Voici la Terre à la fin du Crétacé.  
Une planète dont le climat, soumis  
à la tectonique des plaques, est  
en train de changer...

PAR PASCALE-EMMANUELLE LAPERNAT-GUILLAUMONT

**V**oici 66 millions d'années (Ma),  
la Terre ressemble à un para-  
dis naturel. La faune abonde,  
les dinosaures triomphent,  
la flore déborde de créativité  
avec des fougères géantes et des arbres  
pouvant dépasser 90 m de hauteur, l'essor  
des plantes à fleurs (angiospermes) per-  
met la diversification et la coévolution des  
insectes... Pourtant, malgré les apparences,  
cet éden est très perturbé, tant sur le plan cli-  
matique qu'écologique. Pourquoi? La dérive  
des continents est déjà bien avancée : à la fin



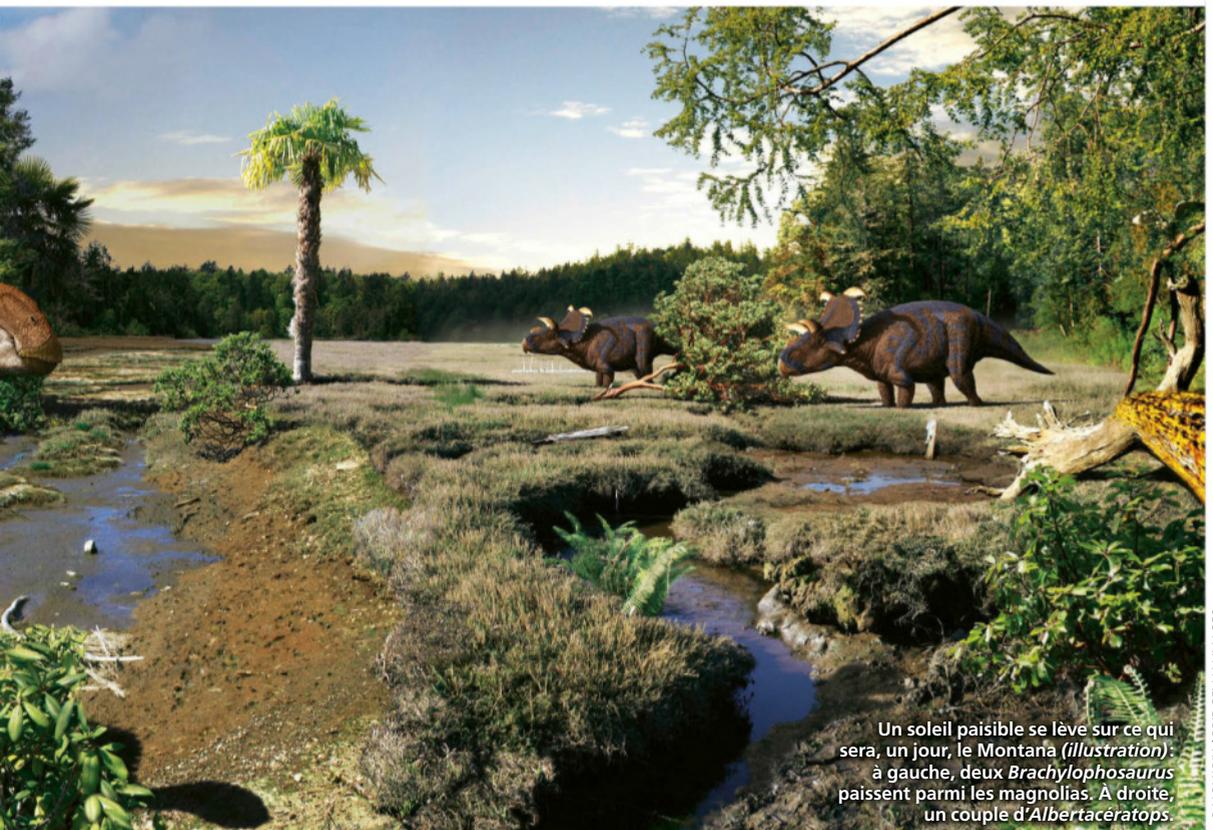
du Crétacé, le supercontinent s'est disloqué pour laisser émerger les continents tels que nous les connaissons aujourd'hui. L'Amérique s'éloigne de l'Afrique et de l'Europe, avec l'ouverture de l'océan Atlantique par le sud. Le nord et le sud du continent américain prennent leurs distances, le nord est divisé par une mer intérieure, la partie montagneuse de l'ouest (Lamaridia) est isolée de l'est (Appalachia). Le nord est lié au Groenland et au nord de l'Europe. Celle-ci est constituée d'un vaste archipel. Elle est en grande partie sous l'eau : notre planète, en effet, est recouverte à 80 % par les océans (contre 70 % aujourd'hui) ; leur niveau est 100 m à 200 m au-dessus du niveau actuel.

Ce qui sera l'Inde se détache du bloc sud, qui formera l'Antarctique et l'Australie. C'est une île gigantesque qui se dirige vers l'Asie en s'éloignant de Madagascar. Certains chercheurs parlent même d'une grande Inde, "Greatest India", avec toute une partie qui disparaîtra sous le continent asiatique lors de la collision qui sera à l'origine de l'Himalaya.

Au sud, l'Antarctique et l'Australie sont encore reliés, expliquant une continuité de leur faune et de leur flore, l'Australie remontant vers l'Asie. L'Amérique du Sud se détache progressivement de l'Antarctique. Toutefois, cette configuration ne permet pas encore la circulation océanique circumpolaire qui aura un rôle déterminant pour notre climat.

### ACTIVITÉ VOLCANIQUE

Ces vastes mouvements dus à la tectonique des plaques ont pour conséquence une intense activité volcanique, notamment le long des dorsales océaniques, ce qui entraîne des bouleversements climatiques. "Le cycle du carbone, la pression partielle de  $CO_2$  atmosphérique et donc les variations du climat dans de grandes échelles de temps sont intimement liés à la tectonique des plaques", explique Guillaume Le Hir, enseignant chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). Le paléoclimatologue Pierre Sédulchre, directeur de recherche au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) à l'Institut



Un soleil paisible se lève sur ce qui sera, un jour, le Montana (illustration) : à gauche, deux *Brachylophosaurus* paissent parmi les magnolias. À droite, un couple d'*Albertosaurus*.

# Quel lien entre climat et tectonique des plaques ?

**PERMIEN -250 Ma**

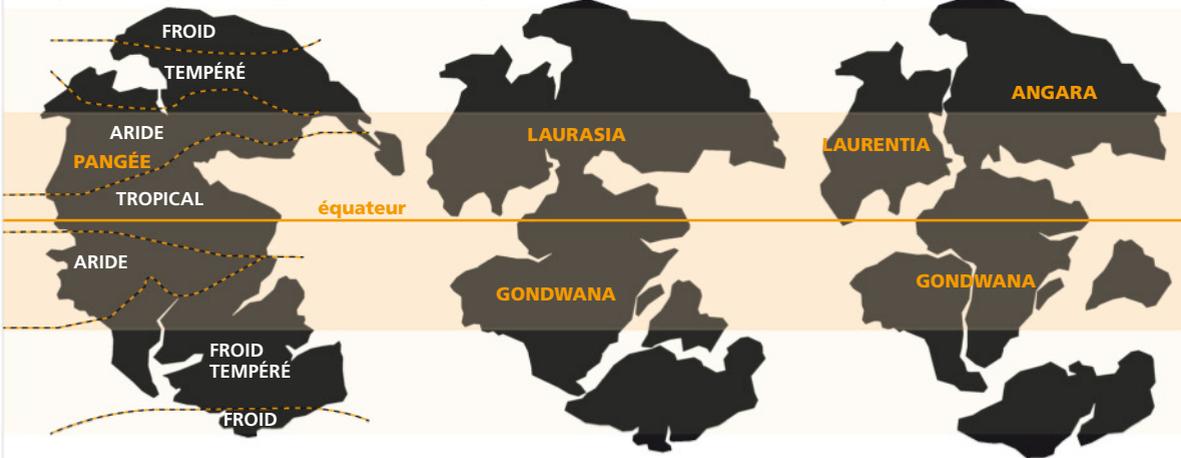
Température moyenne fin de période: 31°C

**TRIAS -200 Ma**

Température moyenne: 31°C à 20°C

**JURASSIQUE -145 Ma**

Température moyenne: 24°C à 18°C



**Le cycle du carbone est un équilibre entre les sources et les puits de carbone.** La source est essentiellement le volcanisme, plutôt constant, or celui-ci est lié à l'expansion des dorsales océaniques. Par ailleurs, les puits sont soit organiques, avec l'enfouissement des organismes dans les sédiments; soit inorganiques, avec l'altération

des silicates. Les puits organiques dépendent de la tectonique car le flux de sédiment est plus important dans les zones de montagnes, appelées orogènes. L'altération des silicates, quant à elle, est le résultat de réactions chimiques et physiques d'érosion, dont les vitesses sont fonction de la température de l'environnement: plus

l'eau est chaude, plus les précipitations sont importantes. Lorsque la Pangée s'est disloquée, le cycle de l'eau s'est modifié, et les précipitations plus fréquentes ont accéléré l'érosion des roches silicatées. S'est donc ensuivi un refroidissement du climat, mais avec de fortes fluctuations des températures moyennes globales.

Pierre-Simon-Laplace (CNRS), souligne que le fractionnement du supercontinent Gondwana (voir ci-dessus) a modifié tout le cycle de l'eau, mettant fin à son climat continental extrêmement sec: "Les océans, en s'évaporant, ont apporté plus d'eau, des régimes de moussons, le renforcement de nombreux lacs et rivières. La végétation a pu se développer avec des forêts tropicales, mais aussi des forêts tempérées aux pôles, des arbres à feuilles persistantes, permettant à la faune de se nourrir toute l'année."

Les paléoclimatologues se sont penchés sur le climat de la fin du Crétacé en s'appuyant, entre autres, sur l'analyse des carottes de sédiments marins. Comme l'explique Guillaume Le Hir: "Les sédiments permettent de remonter jusqu'à 180 Ma. En mesurant les isotopes stables de l'oxygène contenus dans la calcite (CaCO<sub>3</sub>) de la coquille des foraminifères [protozoaire, micro-organisme du plancton, NDLR], on arrive à estimer les variations de température du fond des océans.

Ces paléothermomètres nous permettent de déduire que le climat d'alors était assez chaud. Après un optimum au milieu du Crétacé, la température est redescendue jusqu'à la fin de cette période, avant que les conditions ne soient complètement bouleversées lors de la crise Crétacé-Tertiaire."

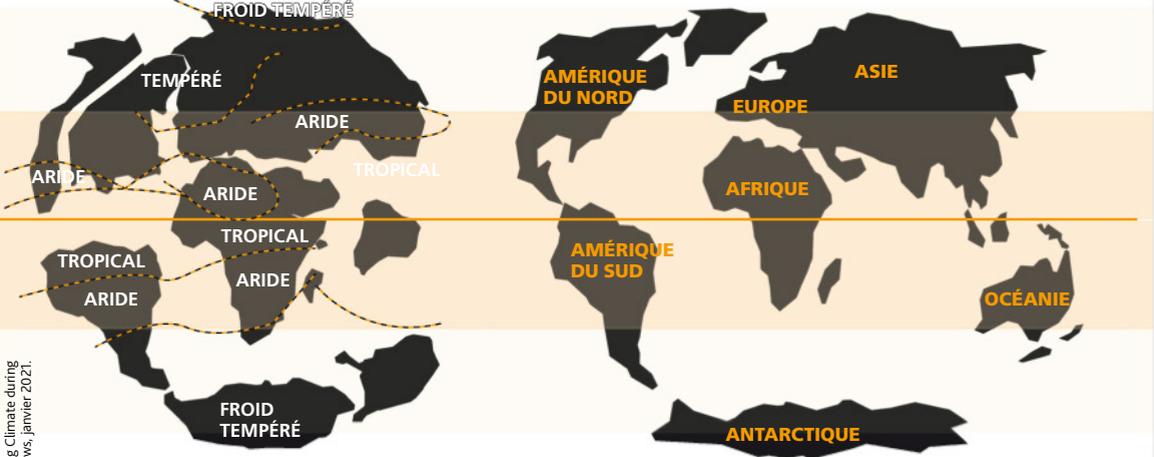
Les chercheurs estiment ainsi que la température de l'océan pouvait s'élever entre 10°C et 15°C au-dessus des 2°C actuels des fonds marins. Ce climat chaud ne permettait théoriquement pas la formation des calottes glaciaires: les pôles étaient soumis à de fortes variations saisonnières, l'hiver étant froid et enneigé les longs mois de nuit polaire. Mais le climat du Crétacé a connu de grandes oscillations: "À très courte échelle, de l'ordre du million d'années, l'Antarctique s'est recouvert d'une calotte glaciaire, développe Pierre Sépulchre. Les modèles récents permettent de lever des paradoxes sur cette très longue époque du Crétacé en prenant en compte le développement des angiospermes.

**CRÉTACÉ -66 Ma**

Température moyenne: 28°C à 20°C

**AUJOURD'HUI**

Température moyenne: 15°C



Celles-ci ont eu une rétroaction sur le climat, par évapotranspiration. Cette évaporation a augmenté quand la pression de  $CO_2$  ( $pCO_2$ ) a diminué, passant de 2 000 ppm au milieu du Crétacé (de 140 à 100 Ma), à 1 000 ppm, voire 300 ppm (en dessous du taux actuel) à certains moments de la fin du Crétacé. En effet, les plantes absorbent du  $CO_2$ : moins il est présent, plus elles ont besoin d'ouvrir leurs stomates pour l'approvisionner, ce qui augmente la perte d'eau."

**28°C DE MOYENNE PLANÉTAIRE**

"L'étude de la flore et des pollens apporte de nombreux arguments à ces études, poursuit Guillaume Le Hir. Selon le type de feuilles fossilisées retrouvées, les assemblages ou encore la présence ou l'absence de certains pollens, les paléobotanistes arrivent à déterminer le type de climat qui régnait. L'étude des roches apporte d'autres informations: la présence d'évaporite et de calcrète sont des indicateurs lithologiques d'un climat aride et chaud [déserts de Mongolie, Amérique du Sud, Afrique centrale, NDLR]. La bauxite se forme en conditions chaudes et humides (tropical). La kaolinite, elle, indique un climat tempéré, alternant des périodes humides et sèches." Christopher Scotese, de l'université Northwester (Evanston, États-Unis) a publié l'évolution du climat sur 540 Ma dans *Earth Science Reviews*, en 2021 (voir schéma ci-dessus). Il estime le maximum de

“ Après un optimum, la température est peu à peu descendue jusqu'à la fin du Crétacé ”

la température moyenne globale au milieu du Crétacé à 28°C (34°C aux tropiques, 13°C aux pôles), contre 20°C à la fin du Crétacé (et environ 15°C actuellement, mais en augmentation). Le pic de chaleur correspond à une période de changements atmosphériques et océaniques, un appauvrissement de l'océan en oxygène, une  $pCO_2$  (pression partielle de gaz carbonique) élevée... Le refroidissement a ensuite permis le retour de la neige aux pôles, et un abaissement du niveau de la mer. Les conditions climatiques très changeantes en cette fin de Crétacé soutiendraient donc l'hypothèse d'un déclin des dinosaures au cours du million d'années précédant la météorite (voir pp. 32-37). Le volcanisme a lui aussi contribué à ces bouleversements. Certains événements, tels les trapps du Deccan en Inde (voir pp. 80-81), ont pu modifier fortement et rapidement l'atmosphère, et acidifier les océans. Finalement, quand la météorite frappe notre planète, voici 66 Ma, elle porte peut-être l'estocade à un paradis des dinosaures... au bord du chaos. ■



# 15 espèces qui dominent au Crétacé

Dinosaures, mais aussi reptiles et mollusques, se partagent un monde plus chaud qu'aujourd'hui. Les espèces que nous présentons ici ont un point commun : elles auront toutes disparu à la fin de l'ère secondaire. PAR PASCALE-EMMANUELLE LAPERNAT-GUILHAUMON

**L'**évolution du climat et de la flore, avec l'essor des plantes à fleurs, entraîne celle de la faune avec de nouveaux dinosaures : hadrosaures, céraptopsians. Les scientifiques parlent de radiation évolutive. Au Crétacé, tous les grands groupes actuels existent : tortues et crocodiles, poissons, céphalopodes, mammifères, oiseaux... mais ce sont les dinosaures qui dominent le monde ! Les paléontologues en découvrent plus d'une vingtaine d'espèces par an. Les dinosaures se sont adaptés aux climats jusqu'aux latitudes extrêmes, comme le confirme Patrick Druckenmiller (université d'Alaska) dans une étude publiée en 2021 dans *Current Biology*. Des stratégies polaires ont permis à des espèces d'y prospérer "en maintenant une température corporelle supérieure à celle du milieu", dit le chercheur Nicolas Séon, dont la thèse portait sur la thermophysologie des reptiles marins du Mésozoïque. La thermorégulation chez les dinosaures fait débat. L'endothermie, qui semble être la règle pour de nombreuses espèces, pourrait résulter d'une homéothermie inertielle : la masse des dinosaures leur permettait de garder une température corporelle adéquate.

## **Quetzalcoatlus northropi**

ENVERGURE : DE 10 M À 12 M

AMÉRIQUE DU NORD

ORDRE PTEROSAURIA FAMILLE AZHDARCHIDAE

Malgré de grandes ailes formées de membranes, un doute subsiste sur sa capacité de vol tant il était lourd. Il devait néanmoins planer, la structure de ses os étant allégée. À terre, il avançait à 4 pattes, s'appuyant sur ses ailes repliées. Son régime alimentaire est mal connu. Il n'existe qu'une espèce de ce genre, mais les ptérosaures de grande envergure étaient présents sur tous les continents. Ces reptiles volants n'étaient pas des dinosaures, ne partageant pas la totalité de leurs caractères, même si le suffixe "-saure" prête à confusion !



## **Velociraptor mongoliensis**

L: DE 1,5 M À 2 M - H: ENV. 50 CM AUX HANCHES – ASIE  
ORDRE SAURISCHIA FAMILLE DROMAEOSAURIDAE

Dans le désert aride et chaud de Mongolie, ce théropode carnivore agile côtoyait une grande diversité de dinosaures, tels les ankylosaures, les tarbosaurus ou des ptérosaures. Le fossile *Fighting Dinosaurs* immortalise le combat d'un protocératops avec un vélociraptor. Il était aussi charognard opportuniste. De la famille des dromaeosaures, il arborait des plumes, ou proto-plumes, et ses pattes arrière étaient munies d'une grosse griffe en forme de faucille mobile à la place du deuxième doigt.

## **Spinosaurus aegyptiacus**

L: DE 10 M À 15 M – AFRIQUE DU NORD  
ORDRE SAURISCHIA  
FAMILLE SPINOSAURIDAE

Découvert en Égypte (d'où son nom), ce théropode était le plus grand des prédateurs. Il est supposé être semi-aquatique à cause de ses larges doigts de pieds palmés, de sa queue évoquant celle d'un crocodile et de son régime piscivore – selon les données de la géochimie. Ce partage des niches écologiques a permis la coexistence de plusieurs superprédateurs à la même époque. Sa crête dorsale, pouvant atteindre 160 cm, est formée d'épines recouvertes d'une peau épaisse.



## ***Carnotaurus sastrei***

L: DE 7M À 9M – AMÉRIQUE DU SUD

ORDRE SAURISCHIA FAMILLE ABELISAUURIDAE

Ce "taureau carnivore" avait des bras encore plus petits que le *T. rex*, rendant ces membres bien inutiles...

Son nom vient des cornes qu'il porte sur le crâne, pouvant servir à blesser ses proies. Son museau haut et court portait des dents longues et fines. Il vivait au côté du titanosaure *Chubutisaurus*. Contrairement à de nombreux théropodes, il ne semblait pas porter de plumes. Les Abelisauridés étaient présents en Afrique, en Europe, en Inde et en Amérique du Sud.

## ***Antarctopelta oliveroi***

L: 4,3M – ANTARCTIQUE

ORDRE ORNITHISCHIA (INFRA-ORDRE ANKYLOSAURIA) FAMILLE NODOSAURIDAE

Cet ankylosaure s'était adapté au climat froid, et parvenait à maintenir une température corporelle supérieure à celle de son environnement malgré une taille moyenne. La calotte glaciaire qui recouvre désormais le continent ne permettant pas les fouilles, il est le seul ankylosaure connu de cette région.

À la fin du Crétacé, l'Antarctique et l'Amérique du Sud commençaient à s'éloigner.



## *Anagaudryceras* sp.

ORDRE AMMONITE

De la famille des céphalopodes, ces mollusques marins étaient très abondants au Crétacé, dans toutes les mers. Avec les bélemnites, elles étaient la proie

de nombreux prédateurs. Les coquilles, d'aragonite ou de calcite, mesurent quelques centimètres pour la plupart des espèces, mais la plus grande ammonite trouvée mesure 2,55 m ! Fossiles stratigraphiques, elles sont de bons marqueurs chronologiques. Un gisement étonnant, la "dalle aux ammonites", se trouve dans le sud de la France, à Digne-les-Bains.



## *Elasmosaurus platyurus*

L: DE 10 M À 14 M – AMÉRIQUE DU NORD – ORDRE PLESIOSAURIA FAMILLE ELASMOSAURIDAE

Ce reptile marin était un piscivore, également amateur de bélemnites et autres céphalopodes. Il avait des pierres dans l'estomac, des gastrolithes, pour aider la digestion. Les quatre nageoires, ou palettes natatoires, de ce plésiosaure rendaient sa nage très efficace. Caractérisé par un très long cou de 70 à 72 vertèbres, il détient un record ! Son cousin canadien *Albertonectes* avait un cou de 7 m (76 vertèbres) pour un corps postcrânien de 11,6 m ! Parmi les plésiosaures, le sous-ordre des pliosaures se distingue par un cou court, robuste, et une grosse tête, adaptés à leur régime d'hyper carnivores.



## *Nanuqsaurus hoglundi*

L: DE 6M À 7M – AMÉRIQUE DU NORD

ORDRE SAURISCHIA FAMILLE TYRANNOSAURIDAE

Aussi appelé "lézard ours blanc", ce cousin du *T. rex* était petit, couvert de plumes lui permettant de résister à la nuit d'hiver polaire enneigé du nord de l'Alaska (alors Laramidia) : bien que le climat soit tempéré avec une température moyenne annuelle de 6°C, les variations saisonnières étaient fortes. Comme d'autres espèces polaires, son cycle de reproduction était adapté à son milieu, avec de longues périodes d'incubation. Ses proies pouvaient être de petits mammifères ou d'autres dinosaures comme le centrosaure *Pachyrhinosaurus*.



## *Mistralazhdarcho maggii*

ENVERGURE: DE 4 M À 6 M – EUROPE

ORDRE PTEROSAURIA

FAMILLE AZHDARCHIDAE

Ce reptile volant découvert dans les Bouches-du-Rhône a pour particularité d'être édenté, mais sa mandibule possédait une lame osseuse en son milieu pouvant s'emboîter dans la mâchoire supérieure, comme son homologue marocain *Alanqa saharica*.



## **Albertaceratops nesmoi**

L: 6M - H: 2M - **AMÉRIQUE DU NORD**

**ORDRE ORNITHISCHIA**

**FAMILLE CERATOPSIDAE**

Ce marginocéphale, trouvé au Canada, arbore deux grandes cornes sur le front, une crête osseuse sur le museau et une grande collerette pourvue également de cornes. Celles-ci pouvaient servir à le protéger des féroces morsures dans le cou des superprédateurs, ou peut-être à la régulation thermique. Il vivait en troupeau, comme beaucoup d'autres cératopsidés, dont 44 genres sont connus.



## **Mansourasaurus shahinae**

L: DE 8M À 10M - **AFRIQUE CONTINENTALE**

**ORDRE SAURISCHIA FAMILLE TITANOSAURIA**

Ce titanosaure herbivore était pourvu de plaques osseuses sous la peau, des ostéodermes. Malgré ses 10 m de long, son poids est estimé à 5 t: le poids d'un éléphant.

## *Aquilolamna milarcae*

ENVERGURE : PRÈS DE 2 M - L : 1,70 M - AMÉRIQUE CENTRALE

ORDRE LAMNIFORMES

Le requin aigle, trouvé au Mexique, a une morphologie singulière avec ses longues nageoires pectorales. Sa bouche était adaptée à un régime filtreur, planctonivore. Il compte parmi les quelque 250 espèces de requins et de raies qui pouvaient exister à la fin du Crétacé, comme en témoignent les gisements marins de phosphates du Maroc, particulièrement bien préservés. Sa découverte dans le golfe du Mexique a fait reculer l'âge de la lignée des requins planctonivores.



## *Tarbosaurus bataar*

L : DE 12 M À 14 M - ASIE

ORDRE SAURISCHIA

FAMILLE TYRANNOSAURIDAE

Équivalent asiatique du *T. rex*, La puissante mâchoire de ce théropode carnivore (parfois charognard) possédait un peu plus de dents (entre 60 et 64 contre 58) que son cousin nord-américain. Parmi ses proies, les titanosaures comme *Nemegtosaurus*.



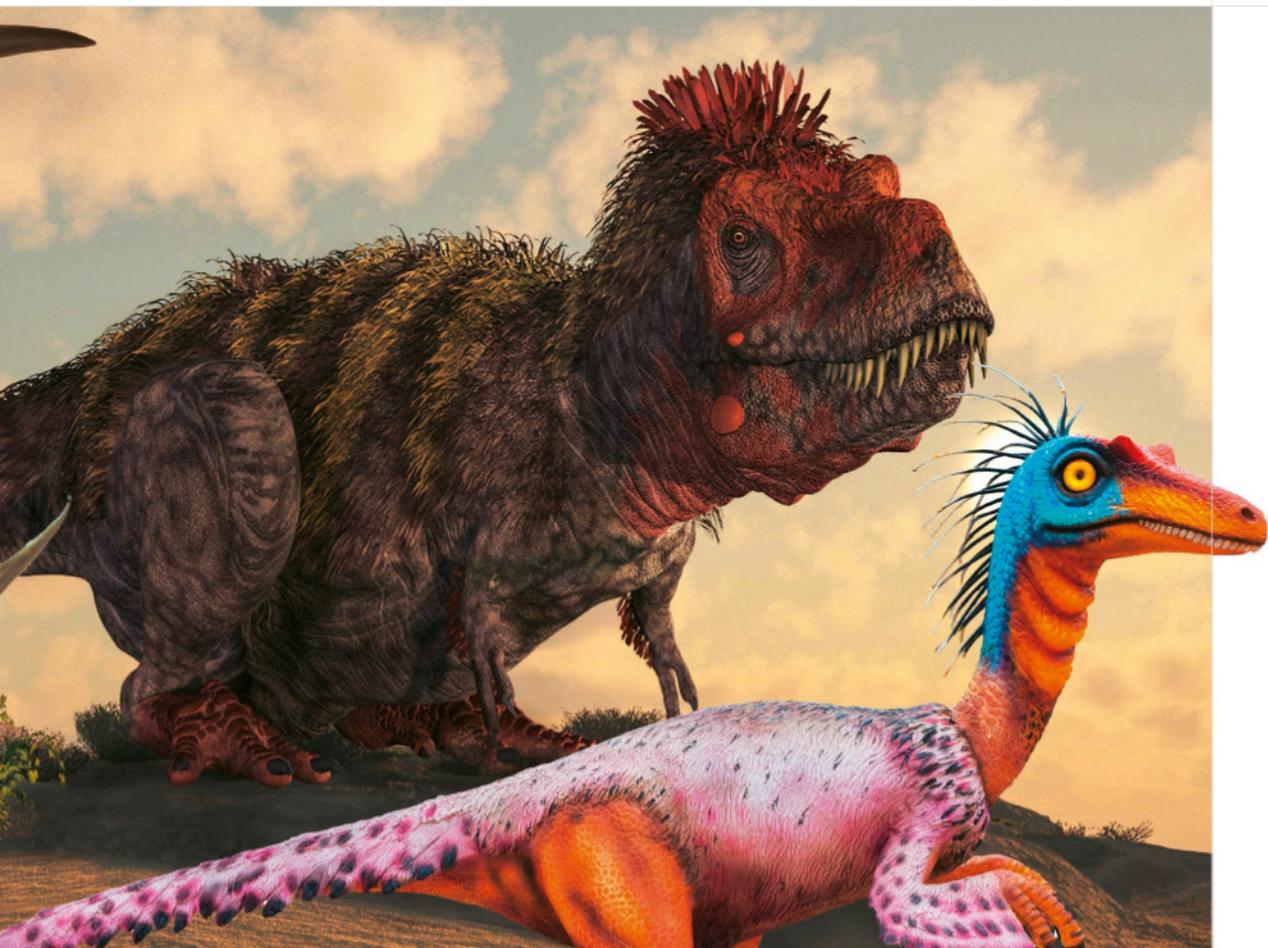
## *Dreadnoughtus schrani*

L : ENV. 27 M - AMÉRIQUE DU SUD

ORDRE SAURISCHIA (INFRA-ORDRE SAUROPODES) FAMILLE TITANOSAURIA

Cet herbivore géant est l'un des dinosaures les plus lourds. Le spécimen découvert entre 2005 et 2009 en Argentine était un "ado" en pleine croissance et atteignait déjà les 26 m... À lui seul, son cou mesurait plus de 11 m. Les nombreux sacs aériens contenus dans les vertèbres (la pneumatisation) allégeaient le poids de l'animal : les études sur son cousin le *Sauroposeidon* montrent que son cou était composé à 75 % d'air. Leur taille devait les protéger des prédateurs tels que les mégaraptors *Maip macrothorax*, découverts en 2019, qui mesuraient entre 9 m et 10 m de long pour 3 m de haut. Côté alimentation, les arbres géants qui occupaient l'actuelle Patagonie devaient largement subvenir à leurs besoins et ceux de leurs contemporains *Puertasaurus*, qui pouvaient atteindre les 30 m.





## DINOSQUÈSACO?

Les dinosaures sont divisés en deux types. Une classification qui est en régulière révision, avec l'avancée de la recherche.

**LES SAURISCHIENS**, dont le bassin ressemble à celui d'un lézard, sont eux-mêmes divisés en 2 groupes : les théropodes, bipèdes et carnivores ou piscivores ; et les sauropodomorphes, quadrupèdes au long cou et longue queue.

**LES ORNITHISCHIENS**, herbivores, dont le bassin ressemble à celui des oiseaux, sont divisés en 3 groupes : les ornithopodes, comme les hadrosauridés, sont des bipèdes à "bec de canard" ; les thyroéphores, comprenant les ankylosaures, dotés d'une épaisse armure, et les stégosaures, aux pics et plaques osseuses ; enfin les marginocéphales à collerette (cératopsiens) ou dôme crânien (pachycéphalosaures).

## *Stenonychosaurus inaequalis*

**L: 2,4 M - H: 90 CM - AMÉRIQUE DU NORD**  
**ORDRE SAURISCHIA FAMILLE TROODONTIDAE**

Ces petits dinosaures, trouvés au Canada, ressemblaient à des oiseaux. Ils avaient un cerveau bien développé, une bonne vision binoculaire, et des pattes musclées leur permettant de courir vite. Les mains terminées par des griffes, et les pattes arrière pourvues d'une griffe en forme de faucille rétractile comme les dromaeosauridés, évoquent un comportement prédateur ingénieux, mais leurs petites dents pointent vers un régime plutôt omnivore.

# Les oiseaux, ces dinos réchappés de l'extinction

Comment les ancêtres des oiseaux modernes, de petits dinosaures à plumes d'apparence modeste, les euornithes, ont-ils survécu à la chute de l'astéroïde qui décima les autres "terribles lézards" ? PAR LISE GOUGIS

**C'**est l'une des grandes énigmes de la paléontologie. Comment le petit groupe des euornithes a-t-il pu donner naissance aux néornithes, c'est-à-dire aux 10 000 espèces d'oiseaux modernes ? *"Le problème, c'est que nous ne disposons que de très peu de fossiles de la fin du Crétacé et du début du Paléocène pour répondre à cette question"*, pointe Tyler Lyson, paléontologue au musée de la nature et des sciences de Denver (États-Unis). Mais grâce à de nouvelles découvertes et aux avancées technologiques de ces dernières années, les recherches sur cette question sont en plein boom. *"Par exemple, avec de nouvelles technologies d'imagerie, nous sommes aujourd'hui capables de reconstruire l'anatomie d'oiseaux fossiles en trois dimensions à très haute résolution, ce qui nous permet de mieux comprendre leur évolution et les facteurs qui ont contribué à leur faire traverser la crise du Crétacé-Paléogène"*, illustre Daniel Field, paléontologue à l'université de

Bath (Royaume-Uni). De quoi rassembler de nouvelles pièces du puzzle.

Selon l'étude d'une équipe de l'université de Toronto parue en 2016, le régime alimentaire aurait été un facteur clé de leur réussite. Les chercheurs ont analysé plus de 3 000 dents d'oiseaux – moins rares que les fossiles entiers. Ils ont alors constaté que les oiseaux qui en étaient dotés ont disparu, tandis que ceux pourvus d'un bec corné ont subsisté. Cette particularité leur aurait permis de picorer des graines, l'une des rares sources de nourriture encore présente après la catastrophe. Un avantage de taille sur les herbivores et carnivores stricts.

## FORÊTS DÉCIMÉES

L'habitat est une autre piste pointée par les travaux de Daniel Field et ses collègues, publiés en 2018. Ils ont examiné à la loupe des fossiles microscopiques de pollens et de spores, datant du premier millier d'années qui a suivi l'extinction : 80 % d'entre eux provenaient de





Les travaux du paléontologue Daniel Field suggèrent que les oiseaux terricoles, possédant de longues et robustes pattes, auraient survécu à l'impact de l'astéroïde.

© PHILIP M. KRZEMINSKI

S'il manque la tête, le fossile de *Fujianvenator prodigiosus* montre de longues pattes faisant penser à un oiseau de type héron, une caractéristique bien différente d'archéoptéryx, plus proche du pigeon.



seulement deux espèces de fougères. *“Les forêts ont terriblement souffert de l’impact de l’astéroïde et de ses conséquences à long terme – l’obscurité et le froid qui ont affecté la photosynthèse –, si bien qu’elles ont été décimées pendant des centaines, voire des milliers d’années”*, explique le chercheur. Et par conséquent, ceux qui y vivaient aussi. Chez les oiseaux, le groupe arboricole des énantionithes, qui était pourtant l’un des plus diversifiés du Crétacé, a totalement disparu. *“À l’inverse, nos travaux suggèrent que les lignées survivantes des oiseaux modernes étaient principalement terricoles”*, poursuit le spécialiste. La découverte de nouveaux

“ Les petits animaux semblent s’en être mieux sortis que les plus gros, car ils sont généralement capables de se reproduire plus vite ”

## UN NOUVEL ANCÊTRE POUR LES OISEAUX

La plupart des paléontologues considèrent que le premier “oiseau” que la Terre ait connu est le dinosaure à plumes *Archéoptéryx*, dont des fossiles vieux de 150 Ma ont été déterrés en Bavière en 1860. Mais voilà qu’une équipe de l’Académie chinoise des sciences de Pékin a découvert fin 2022 dans la province du Fujian, en Chine, une nouvelle espèce de dinosaure baptisée *Fujianvenator prodigiosus* (illustration), de la taille d’un coq, qui ressemble à un oiseau et date de la même époque. Ses longues pattes semblables à celles des hérons ou des échassiers laissent penser qu’il vivait dans les marécages et pouvait courir vite. Il était donc très différent d’*Archéoptéryx* qui ressemblait davantage à un pigeon. Selon les auteurs, cela pourrait signifier qu’à la fin du Jurassique (135 Ma), les dinosaures avaient déjà évolué pour donner naissance à différentes espèces d’oiseaux occupant plusieurs niches écologiques.

fossiles d’oiseaux ayant survécu a en effet montré qu’ils possédaient des pattes longues et robustes comme en ont les canards et les poules qui vivent au sol. Ce serait seulement bien après la catastrophe, quand les forêts se sont rétablies, que les oiseaux survivants auraient réinvesti les arbres.

### EFFET LILLIPUT

Les scientifiques pointent aussi du doigt ce qu’ils appellent “l’effet Lilliput”. *“De manière générale, les petits animaux semblent s’en être mieux sortis que les plus gros. Leurs besoins métaboliques sont plus faibles, ils sont donc moins susceptibles de mourir de faim en cas de catastrophe. Ils sont aussi généralement*





capables de se reproduire plus vite, et de maintenir ainsi leurs populations”, expose Daniel Field. En étudiant l'évolution génétique des oiseaux, le paléontologue a constaté que les oiseaux survivants étaient 80 % plus petits que leurs ancêtres du Crétacé.

Autre hypothèse : les oiseaux devraient leur survie à leur cerveau, selon une étude de l'université du Texas parue en 2021. La tomographie du crâne d'un ichthyornis, un proche parent des oiseaux âgé de 70 millions d'années (Ma) qui n'a pas survécu à la grande extinction du Crétacé, a révélé qu'il possédait des hémisphères

Cet oisillon emprisonné dans l'ambre il y a 99 Ma et découvert au nord du Myanmar ne mesure que 6 cm. Les paléontologues l'ont surnommé “Bélone”, un terme birman pour désigner un oiseau couleur ambre.

cérébraux relativement petits, plus proches des dinosaures non aviaires que des oiseaux modernes. En comparaison, ces derniers sont dotés d'un cerveau dense et volumineux. Cet accroissement cérébral, associé à des fonctions cognitives supérieures, aurait débuté chez leurs ancêtres, ce qui leur aurait permis de survivre et de s'adapter aux changements environnementaux qui ont résulté de l'impact de l'astéroïde. *“Si une caractéristique est absente chez les espèces éteintes, mais présente chez les survivantes, c'est qu'elle a certainement aidé ces dernières”*, affirme Christopher Torres, l'un des auteurs.

### MUE SOUDAIN

Des travaux sino-américains parus en 2023 ont également mis en évidence une autre différence cruciale entre les oiseaux qui ont disparu et ceux qui ont subsisté : le mécanisme de mue de leur plumage. En analysant les plumes d'un petit énantionithe, surnommé Bélone, datées de 99 Ma et préservées dans l'ambre, les paléontologues ont constaté qu'elles présentaient toutes le même stade de développement. Autrement dit, l'oisillon a perdu toutes ses plumes au cours d'une mue soudaine, alors que chez la plupart des oiseaux modernes cette mue est progressive. *“Ça signifie qu'ils se retrouvaient périodiquement tout nus et que cela leur demandait alors plus d'énergie pour maintenir leur température corporelle, qui est plus élevée que celle des mammifères”*, souligne Jingmai O'Connor, conservatrice au musée d'histoire naturelle Field de Chicago (États-Unis), coauteure de l'étude. Ce qui expliquerait pourquoi ils se sont éteints avec la catastrophe, celle-ci ayant fait chuter drastiquement les températures.

*“Toutefois, je ne pense pas qu'il y ait une explication unique à la survie des oiseaux. Certains facteurs expliquent pourquoi des espèces ont disparu et pourquoi d'autres ont subsisté, mais il faut les mettre bout à bout pour avoir une image d'ensemble et comprendre comment s'est opérée cette sélection, estime la spécialiste. Nous aurons encore besoin de nouveaux fossiles pour espérer résoudre une bonne fois pour toutes ce mystère.”* ■

RONAN ALLAIN

MICHAEL J. BENTON

# “Et s'ils avaient été voués à disparaître ?”

Les dinosaures étaient-ils sur le déclin au moment de Chicxulub ? Le débat agite la communauté scientifique. Ronan Allain, spécialiste des dinosaures non-aviens au Muséum national d'histoire naturelle de Paris, et Michael J. Benton<sup>(1)</sup>, paléontologue à l'université de Bristol (Angleterre), livrent leur analyse.

PAR KHEIRA BETTAYEB

Ronan Allain

Michael J. Benton

**SVHS :**  
**La polémique concernant l'état des populations de dinosaures avant leur extinction est-elle récente ?**

**Ronan Allain :**

Non. C'est un vrai serpent de mer qui revient régulièrement sur le devant de la scène depuis au moins une vingtaine d'années : depuis la découverte des traces du cratère causé par la météorite à Chicxulub, au large des côtes mexicaines.

**Michael J. Benton :** De fait, tous les paléontologues sont d'accord pour dire que cet impact est responsable de la disparition des dinosaures. Mais comme au Crétacé supérieur [*période géologique qui a précédé l'extinction de ces animaux, NDLR*], il y a eu également d'importantes éruptions volcaniques, des changements de température et des fluctuations du niveau de la mer, des doutes subsistent quant à savoir si l'astéroïde a été le seul

responsable de cette extinction de masse, et si cette dernière a été brutale ou le fruit de plusieurs millions d'années de déclin...

**SVHS :** **Pourquoi est-il crucial de trancher ce débat ?**

**M. J. B. :** Cette question rejoint une autre interrogation tout aussi passionnante : si la météorite de Chicxulub n'avait jamais croisé l'orbite terrestre, les dinosaures seraient-ils encore là aujourd'hui ? Ou étaient-ils voués à disparaître ? Quoi qu'il en soit, l'absence de consensus sur ce sujet entrave notre bonne compréhension de l'évolution des dinosaures et des moteurs qui l'ont guidée.

**SVHS :** **Quel est votre point de vue sur la question ?**

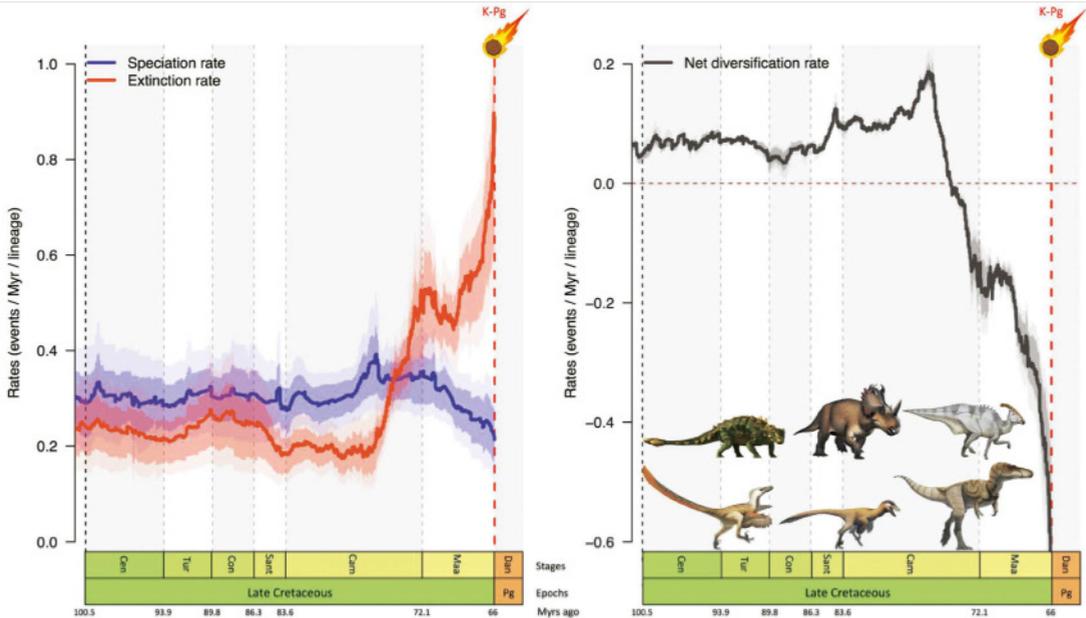
**R. A. :** Je fais partie de ceux qui pensent que les dinosaures étaient encore en pleine possession de leurs moyens au moment de l'impact de Chicxulub et que leur disparition a été brutale. Selon moi, elle est liée à une conjonction d'événements (chute de la météorite, éruption volcanique...) qui se sont par hasard tous déroulés "en même temps", sur une

période de moins d'un million d'années, ce qui est relativement court à l'échelle des temps géologiques. Comme je le souligne dans un chapitre intitulé "Les dinosaures se seraient-ils éteints quoi qu'il arrive ?", publié dans un récent livre<sup>(2)</sup>, à ce jour, cette hypothèse dite "catastrophiste" est la plus communément admise.

**M. J. B. :** Pour ma part, je pense que la météorite de Chicxulub n'a fait que porter le coup de grâce à un groupe déjà affaibli. L'extinction des dinosaures est probablement le résultat d'un long processus commencé plusieurs millions d'années avant cet impact. Comme l'indiquent deux études publiées ces dernières années par mon équipe.

**SVHS :** **Que montrent exactement ces travaux ?**

**M. J. B. :** Parue en 2016 dans la revue *PNAS*<sup>(3)</sup> et réalisée grâce à des modélisations de l'évolution des dinosaures au fil du temps, la première suggère que des dizaines de millions d'années avant leur extinction, le taux de spéciation [*de formation de nouvelles espèces, NDLR*] de certains groupes de dinosaures a ralenti avant



d'être supplanté par le taux de leur extinction. Or cette réduction de leur capacité à remplacer les espèces disparues les a probablement rendus plus vulnérables face au chaos semé sur la planète par l'impact de l'astéroïde. Publiée plus récemment, en 2021, dans *Nature Communications*<sup>(4)</sup>, et menée également avec des outils de modélisation, notre seconde étude a permis de préciser que le nombre d'extinctions d'espèces de dinosaures était supérieur à celui d'apparitions d'espèces nouvelles dès -76 millions d'années (Ma) (voir graphiques ci-dessus). Le début de la fin de leur apogée aurait donc commencé 10 Ma avant la chute de la météorite.

**SVHS: à quoi pourrait être dû ce déclin ?**

**M. J. B. :** Comme le suggère notre étude de 2021, il est probablement lié à un important

**Une étude menée par Michael J. Benton et ses collègues parue dans *Nature Communications* en 2021, a modélisé l'évolution des espèces avant l'impact de l'astéroïde. La courbe bleue montre que le taux d'apparition de nouvelles espèces diminue avec le temps. En rouge, on peut voir la forte augmentation des extinctions d'espèces les 10 derniers millions d'années du règne des dinosaures dont la chute est représentée par la courbe noire.**

refroidissement global vers la fin du Crétacé, quand la température moyenne mondiale a baissé de 7°C. Cela, possiblement, suite à des changements climatiques et écologiques. Chaque degré supplémentaire perdu a dû rendre les dinosaures encore plus vulnérables. Les premières disparitions ont sûrement concerné les herbivores, tels les tricératops. Comme ceux-ci sont cruciaux pour l'entretien et l'équilibre des écosystèmes, leur extinction a dû en induire d'autres, en cascades, dans les autres familles de dinosaures. Nous ne pouvons pas dire combien de temps les dinosaures auraient continué à dominer les écosystèmes dans ces conditions si l'astéroïde n'avait jamais heurté

la Terre. Mais je pense que le climat serait sans doute devenu trop froid pour eux en seulement 5 à 10 Ma.

**SVHS: Existe-t-il des travaux scientifiques qui soutiennent votre point de vue ?**

**M. B. :** Oui. Par exemple, fin 2022, une étude décrite dans la revue *Science Advances* par une équipe internationale de paléontologues a montré que les communautés de dinosaures sont devenues plus simples et ont perdu des espèces au cours des dix derniers millions d'années du Crétacé ["nous constatons un changement dans les faunes de dinosaures du Crétacé supérieur", avec "une perte de mégaherbivores", concluent les auteurs de ces travaux, après analyse

# “ Trouver plus de fossiles dans les continents du Sud est le seul moyen d’avoir une vision globale de l’évolution de tous les dinosaures ”

de 1 600 archives fossiles d’Amérique du Nord et la modélisation des chaînes alimentaires et des habitats écologiques des animaux terrestres et d’eau douce au cours des derniers millions d’années du Crétacé, *NDLR*. Une récente étude chinoise, parue en février 2023 dans *Current Biology*, suggère également un déclin similaire chez les ptérosaures, des reptiles volants de l’époque des dinosaures, qui ont aussi disparu lors de l’impact de l’astéroïde de Chicxulub.

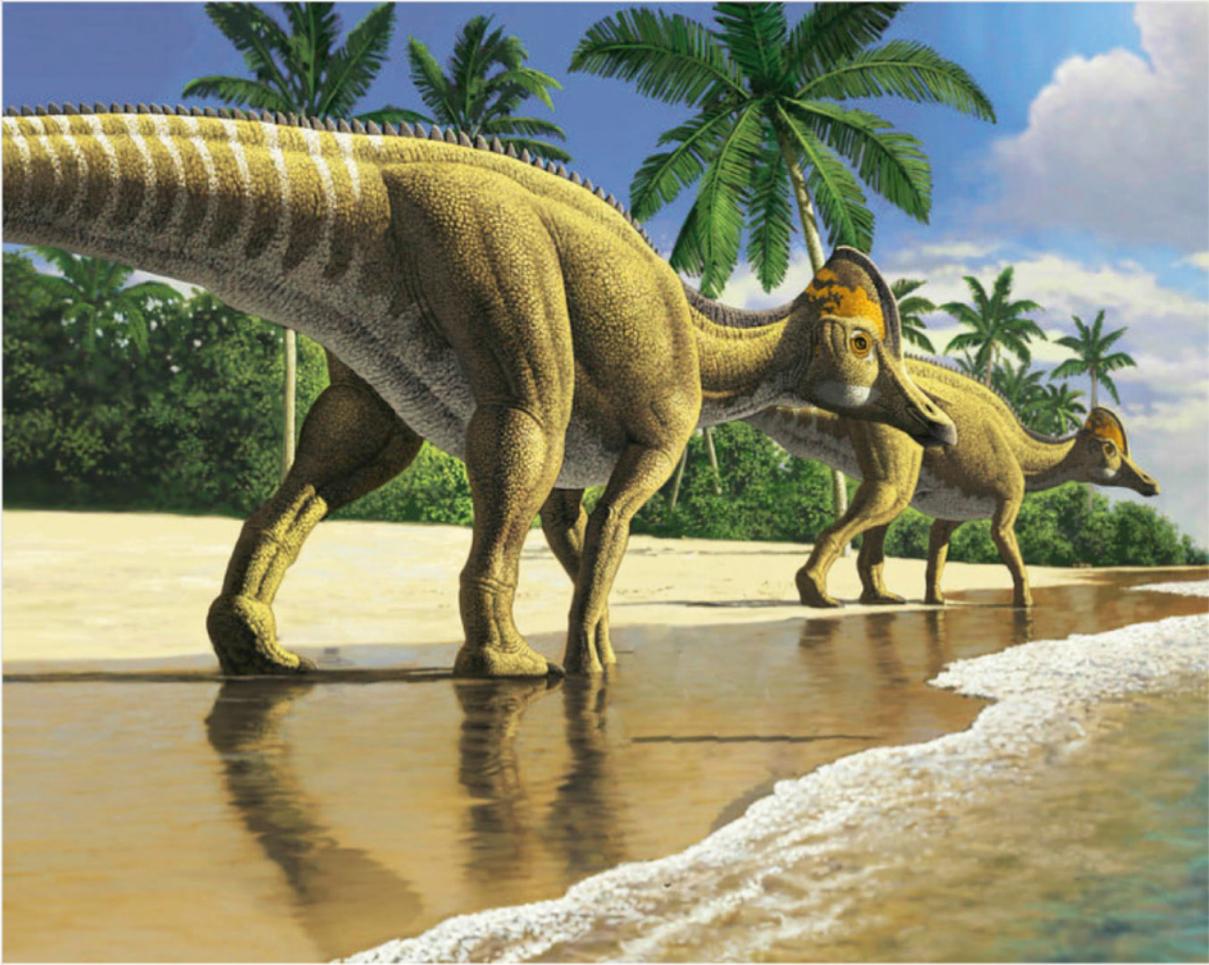
**SVHS: Mais des travaux parus en août 2023 dans la revue *Cretaceous Research* suggèrent, au contraire, que les dinosaures se portaient plutôt bien avant la chute de l’astéroïde ?**

**R. A. :** Effectivement... Codirigés par un collègue du MNHN, Nour-Eddine Jalil, ces travaux ont permis de découvrir, dans le bassin d’Ouled Adboun,

**Selon une étude chinoise parue en février 2023 dans *Current Biology*, les ptérosaures auraient eux aussi commencé à décroître bien avant la chute de la météorite de Chicxulub.**

à Khouribga [la plus grande mine de phosphates à ciel ouvert du monde, située à 120 km au sud-est de Casablanca (Maroc), *NDLR*], des restes de deux nouvelles espèces de dinosaures qui appartiennent à la famille des Abelisauridés [de grands carnivores, homologues des tyrannosaures, *NDLR*]. Ce groupe était inconnu en Amérique du Nord, mais très diversifié sur tous les continents de l’hémisphère Sud et en Europe. Lors d’une autre recherche décrite en 2021 également dans la revue *Cretaceous Research*, la même équipe a rapporté avoir découvert des restes du premier dinosaure à bec de canard d’Afrique, baptisé *Ajnabia odysseus*, datant eux aussi de juste avant la crise Crétacé-Tertiaire. Ensemble,





ces travaux indiquent qu'à cette époque, le nord de l'Afrique était occupé par une faune extrêmement riche et diversifiée... loin d'être en déclin.

**SVHS:** *Ya-t-il eu d'autres résultats récents allant dans ce sens ?*

**R. A. :** Oui. Par exemple, une recherche réalisée par le paléontologue américain Steve Brusatte et des chercheurs brésiliens, arrive à un constat similaire, mais au niveau du Brésil [Parue en 2017 dans *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, et menée

*dans le bassin du Paraná au centre du Brésil, cette étude conclut à "une faune de dinosaures relativement diversifiée à la fin du Crétacé (...) ce qui est plus cohérent avec des écosystèmes dominés par les dinosaures qui ont été soudainement éradiqués par l'impact de l'astéroïde", NDLR].*

**En 2020, des dents et une mâchoire d'hadrosaure ont été découvertes à Sidi Chennane, au Maroc. Or, on le croyait cantonné à ce qui est aujourd'hui l'Amérique et l'Asie. La présence en Afrique de ce spécimen à "bec de canard" ouvre l'hypothèse de sa capacité à nager sur de longues distances.**

**SVHS:** *Donc le débat reste entier... Pourquoi est-il si difficile de trancher ?*

**R. A. :** Car les données actuelles ne sont pas assez robustes pour valider une

“ *Le climat serait sans doute devenu trop froid pour les dinosaures en 5 à 10 Ma* ”



hypothèse plutôt qu'une autre. Et pour cause : les archives fossiles [l'ensemble des os de dinosaures retrouvés et répertoriés, NDLR] correspondant au Crétacé et utilisées dans toutes les études, sont très parcelaires. Certaines périodes sont mieux renseignées que d'autres. Mais surtout, les fossiles étudiés proviennent essentiellement d'Amérique du Nord. Donc les résultats issus de leur analyse ne peuvent absolument pas être généralisés à l'ensemble des communautés de dinosaures qui peuplaient la planète à la fin du Crétacé.

**SVHS: Pourquoi les fossiles disponibles proviennent-ils surtout d'Amérique du Nord?**

**R. A. :** Notamment parce que ce continent est la partie du monde qui concentre, à ce jour, le plus d'affleurements sédimentaires datant de 66 Ma, accessibles aux paléontologues. Ensuite, cette zone a été plus fouillée. Enfin, les conditions nécessaires au processus de fossilisation y étaient plus favorables : présence de boue ou de sable permettant un enfouissement rapide des organismes morts, accumulation de sédiments permettant l'isolement de ceux-ci

pendant plusieurs milliers d'années, voire davantage...

**SVHS: Dans ces conditions, comment déterminer une fois pour toutes si les dinosaures étaient en "phase terminale" ou non, quand la fin de leur monde est arrivée?**

**R. A. :** Nous devons chercher des fossiles datant du Crétacé sur d'autres continents. Comme ont commencé à le faire les auteurs de l'étude d'août 2023. Et comme j'espère y contribuer bientôt lors d'un possible futur projet en cours de construction, qui concernera une autre région du Maroc. Trouver plus de fossiles dans les continents du Sud est le seul moyen d'avoir enfin une vision globale de l'évolution de tous les groupes de dinosaures qui existaient partout sur Terre.

**M. J. B. :** Oui, effectivement, il faut que notre hypothèse du déclin – étayée jusqu'ici seulement avec des données d'Amérique du Nord – puisse être testée avec des données d'une autre région. Ceci dit, trouver suffisamment de fossiles pour ce faire constitue un énorme défi. Il nous faudra attendre encore longtemps pour que le débat sur l'état des faunes de dinosaures avant leur disparition puisse enfin être clos. ■

1. *Auteur de Les Dinosaures tels qu'ils étaient vraiment*, éd. Ulmer, 2021.

2. *La Terre, le vivant, les humains*, éd. La Découverte, 2022.

3. "Dinosaurs in decline tens of millions of years before their final extinction".

4. "Dinosaur biodiversity declined well before the asteroid impact, influenced by ecological and environmental pressures".

# PENDANT CE TEMPS, UN GÉOCROISEUR FONCE VERS LA TERRE...

Le roc qui provoqua la fin de l'ère des dinosaures proviendrait de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter... à moins qu'il ne s'agisse d'une comète.

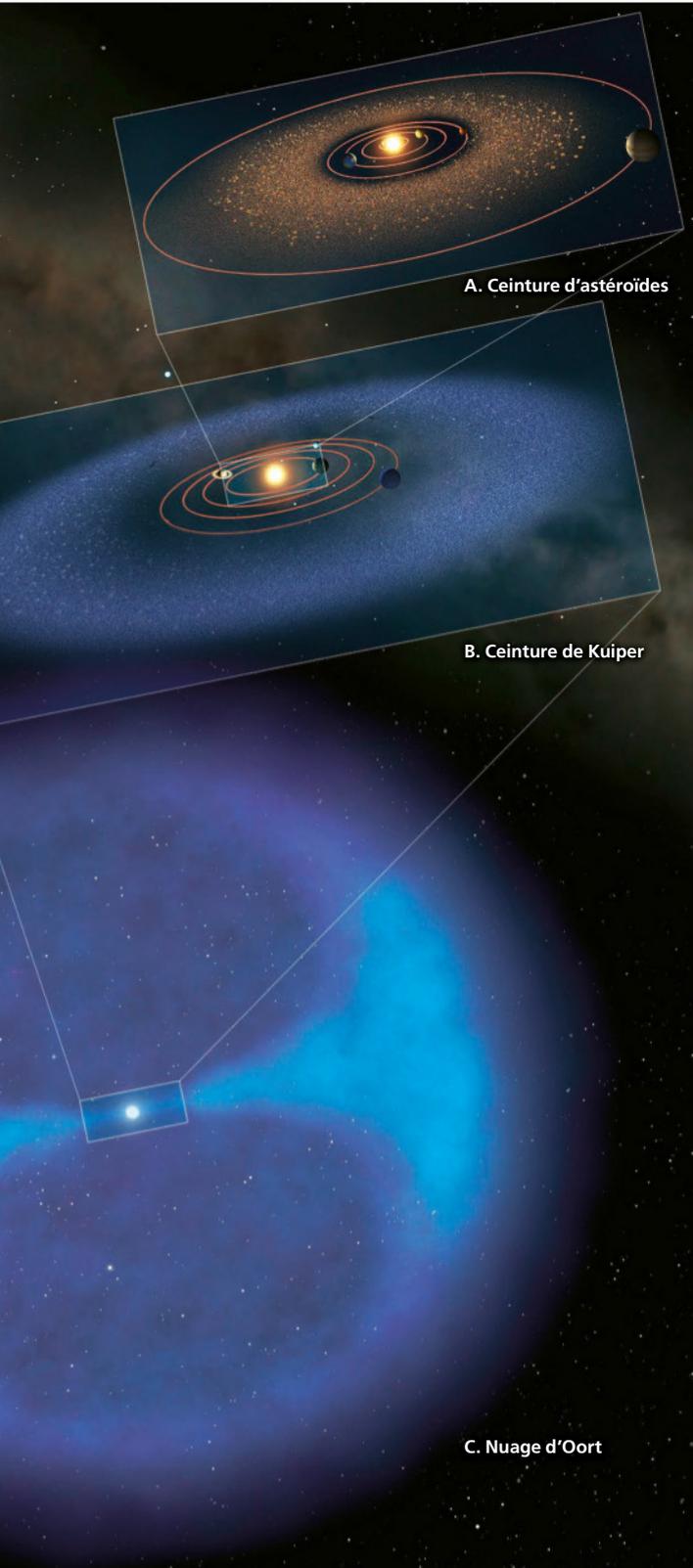
PAR HUGO LEROUX

**I**l y a 66 millions d'années (Ma), une météorite frappe la Terre, générant un cataclysme. Mais d'où vient-elle ? En 2007, l'équipe de William F. "Bill" Bottke, du Southwest Research Institute (SwRI), aux États-Unis, propose une hypothèse : celle-ci proviendrait d'une collision dans la partie intérieure de la ceinture principale d'astéroïdes, située entre Mars et Jupiter (*voir ci-contre*). Il y a 160 Ma environ, une collision aurait morcelé un corps de 170 km de diamètre appelé Baptistina. Certains de ses débris auraient alors été propulsés sur des trajectoires susceptibles de frapper la Terre.

Ce scénario est remis en cause en 2011 par des observations du télescope spatial Wise de la Nasa. Celles-ci suggèrent que la collision aurait eu lieu plus tard, il y a à peine 80 Ma. Un événement trop récent, de fait, pour laisser le temps à d'éventuels débris d'atteindre la Terre. Le mystère autour de l'origine du "tueur de dinosaures" est alors relancé. Mais en 2021, nouveau rebond : une étude cosignée par le même Bill Bottke réduit le champ des possibles. Une nouvelle

## Un voyage de 30 UA à 30 000 UA selon les hypothèses

Pour comprendre les différentes hypothèses sur l'origine de la météorite, il faut visualiser notre Système solaire : une première ceinture d'astéroïdes s'étend entre les orbites de Mars et de Jupiter (A) d'où, selon l'hypothèse de William Bottke en 2007, serait parti l'astéroïde qui a frappé la Terre il y a 66 Ma. Au-delà (B) se trouvent le royaume des planètes géantes gazeuses et la ceinture de Kuiper, soit entre 30 et 55 unités astronomiques (UA = 150 millions de km). Enfin, entre 20 000 UA et 30 000 UA de la Terre, aux confins du Système solaire, gravite le nuage d'Oort (C), d'où aurait pu arriver une comète dévastatrice.

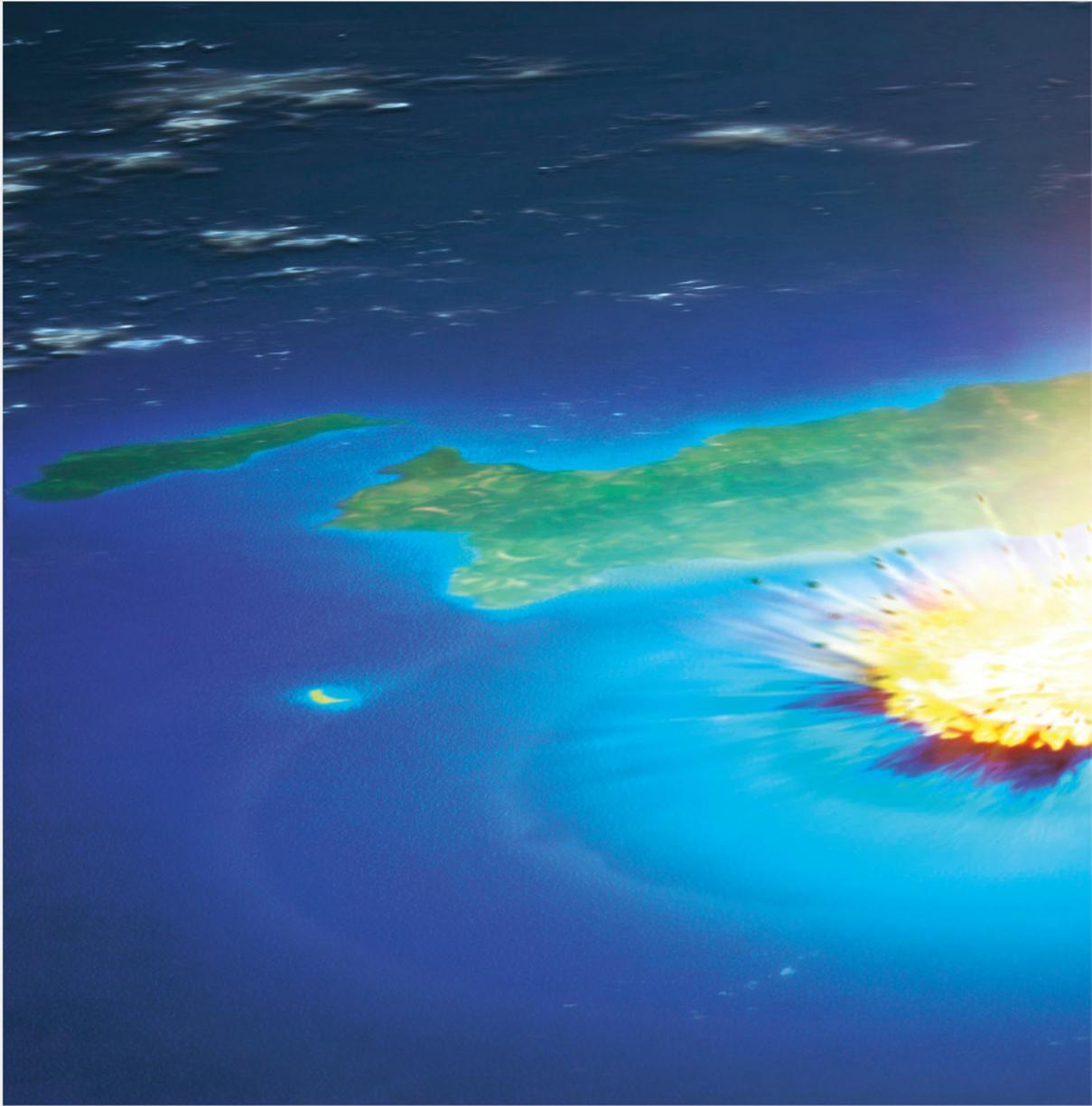


simulation de la population d'astéroïdes suggère que le tueur viendrait, en fait, de la couche extérieure de cette fameuse ceinture... Son équipe a utilisé le supercalculateur Pléiades de la Nasa pour simuler l'évolution des astéroïdes les plus éloignés du Soleil pendant des centaines de millions d'années, en particulier les plus gros – ceux dont le diamètre pourrait dépasser celui de l'impacteur. Leur modèle suggère que la moitié de ceux-ci était composée de chondrites carbonées, un type de roche très peu transformée depuis la création du Système solaire, retrouvé également au niveau du cratère mexicain... Il souligne que la probabilité d'impact avec la Terre est d'un tous les 250 Ma en moyenne.

### DES CHONDRITES ATYPIQUES

Si la plupart des experts accordent aujourd'hui leur suffrage à la thèse de l'astéroïde, il existe néanmoins une autre hypothèse, qui n'a jamais été complètement écartée. Certains suggèrent que le géocroiseur serait en réalité une comète. Celle-ci aurait eu pour origine le lointain nuage d'Oort, un vaste ensemble de corps situé bien au-delà de l'orbite des planètes du Système solaire. En 2021, les astrophysiciens d'Harvard Amir Siraj et Avi Loeb ont soutenu, simulations à l'appui, que ce type de corps glacés, dotés d'une période de révolution très longue – près de deux cents ans –, pouvait se briser en passant près du Soleil, générant des fragments eux-mêmes susceptibles de dévier vers la Terre. Le débat porte aussi sur l'analyse des fameuses chondrites carbonées trouvées dans le cratère mexicain de Chicxulub... car certaines comètes en sont également composées ! Problème : *“Les chondrites de Chicxulub sont atypiques, ce qui rend difficile tout rapprochement avec une comète ou un astéroïde”*, explique Philippe Claeys, géochimiste à l'université Vrijes de Bruxelles.

D'autant que si de récentes missions d'échantillonnages ont augmenté notre compréhension des astéroïdes – comme Osiris Rex en 2023 –, on en sait encore très peu sur la composition des comètes ! *“À ce stade, aucun élément ne permet de trancher le débat, mais les probabilités d'impact jouent davantage en faveur d'un astéroïde”*, conclut néanmoins le chercheur. ■



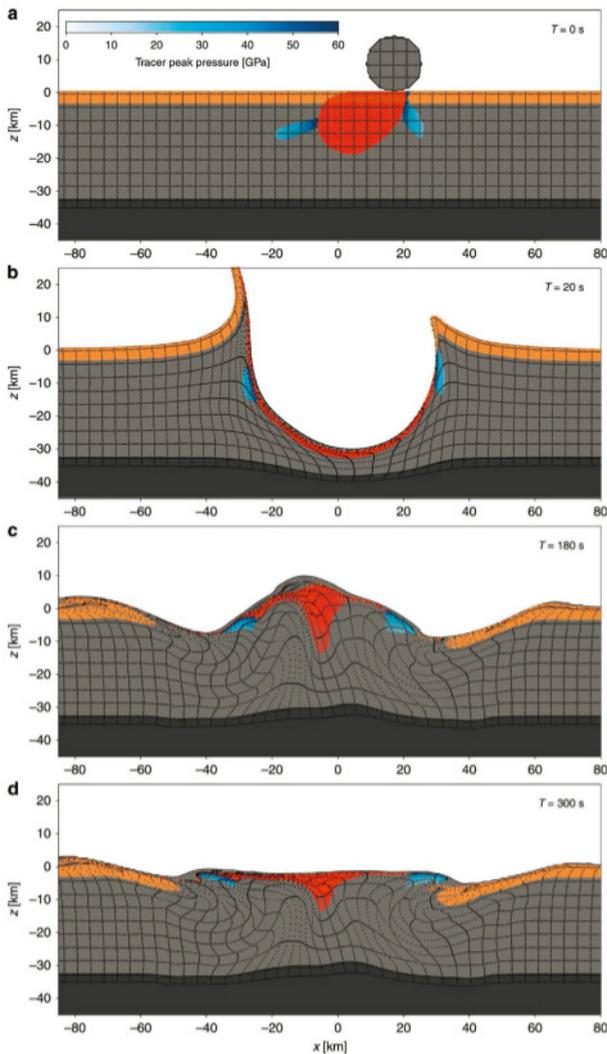
# Chicxulub, le scénario du pire

Illustration de la péninsule du Yucatan au moment où l'astéroïde touche la Terre, il y a 66 Ma.



Il y a 66 millions d'années, une énorme météorite percute la Terre au nord de l'actuel Yucatán. Des recherches récentes éclairent les circonstances exactes de cet impact cataclysmique. PAR HUGO LEROUX

**V**oyons un instant le tableau à travers les yeux d'un dinosaure ayant vécu dans l'actuel golfe du Mexique il y a 66 millions d'années (Ma), au moment de l'extinction Crétacé-Paléogène. Depuis quelques mois, nuit après nuit, une étoile grossit dans le ciel, jusqu'à briller plus fort que la Lune, et peut-être même que le Soleil. Cette étoile, c'est la météorite qui s'apprête à frapper le site de Chicxulub, dans



Graphique tiré de l'étude "A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact". On y voit l'évolution du cratère jusqu'à 5 minutes après l'impact d'un astéroïde de 17 km de diamètre, lancé à une vitesse de 12 km/s.

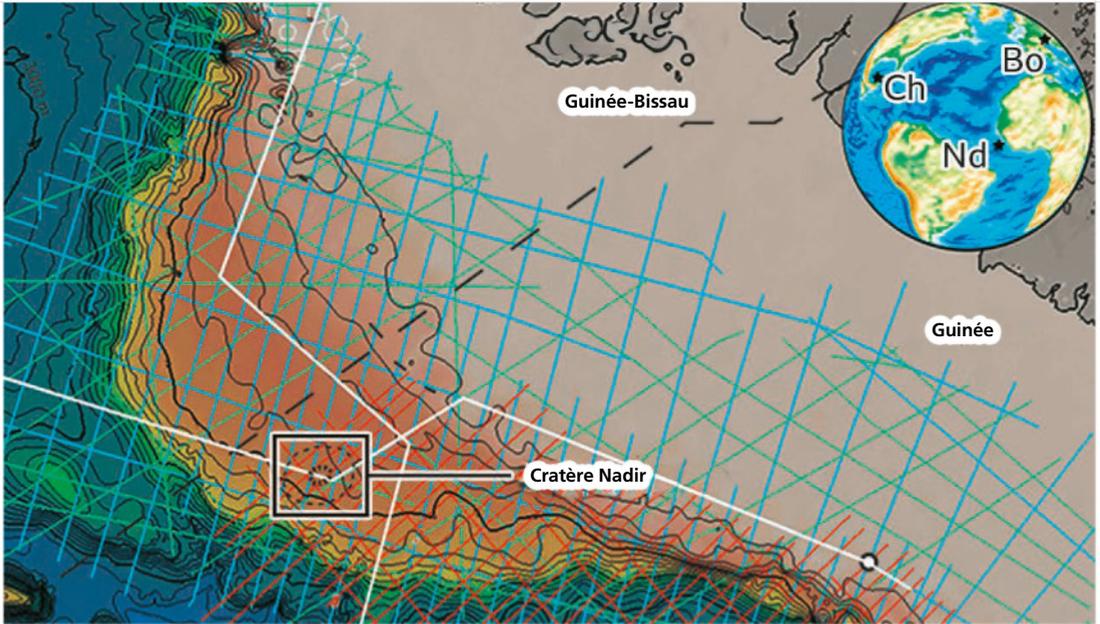
Prenons maintenant de la hauteur et retraçons la collision telle qu'imaginée par Gareth Collins. Dans une publication de *Nature*, en 2022, ce chercheur à l'Imperial College de Londres a simulé différentes trajectoires possibles du projectile de façon à identifier celle qui permet d'expliquer la configuration particulière du cratère de Chicxulub. Aujourd'hui enterré à 1 km de profondeur sous des couches de sédiments, ce dernier a été cartographié grâce à des études sismiques et gravimétriques. Il s'agit d'une "cicatrice" circulaire de 180 km de diamètre, profonde de 20 km, dotée d'une chaîne de montagnes intérieure (que les spécialistes appellent *peak ring*), le tout agencé de façon légèrement asymétrique, ce qui suggère un angle d'impact non vertical. "Pour prendre en compte cette asymétrie, nous avons effectué la simulation d'impact en 3D", souligne Gareth Collins. Pour l'occasion, son équipe a dû recourir au supercalculateur dernier cri DIRAC, installé à l'université d'Édimbourg. Elle propose aujourd'hui ce scénario, jugé le plus plausible : celui d'une météorite de 17 km de diamètre provenant du nord-est et frappant avec un angle d'attaque compris entre 45° et 60°... ce qui a son importance pour la suite des événements.

### UN "BOL" DE 100KM DE DIAMÈTRE

Démarrons à "T.0", à l'instant où notre astéroïde à la trajectoire oblique touche la Terre. Sa partie la plus haute, à 10 km d'altitude,

la péninsule du Yucatán au Mexique. Puis un jour, au printemps peut-être (voir encadré), l'enfer se déchaîne. En un clin d'œil, le gigantesque rocher percute la Terre. Imaginez le choc : sa taille est estimée entre 10 km et 20 km de diamètre, et sa vitesse autour de 20 km/s – un semi-marathon par seconde ! Dans l'instant suivant, une boule de gaz et de poussière enflammée, d'environ 200 km de rayon, dévore tout sur son passage. La puissance de l'impact est estimée à 100 000 milliards de tonnes de TNT... soit plus de 5 milliards de fois la bombe de Hiroshima ! Il va sans dire que toute vie de surface dans cette partie du Mexique est instantanément vaporisée.

“ L'angle de chute est optimal pour arracher beaucoup de matière et lui communiquer la vitesse nécessaire pour occuper la haute atmosphère ”



## YA-T-IL EU UN DEUXIÈME IMPACT?

Lors de sondages sismiques menés sur le plateau de Guinée, au large de l'Afrique de l'Ouest, des chercheurs ont découvert une structure évoquant un cratère large de 8,5 km et profond d'environ 800 m. Celui-ci aurait pu être créé à la fin du Crétacé, voici 66 Ma, à la suite de l'impact d'un corps d'environ 400 m de diamètre. En relation avec Chicxulub? C'est l'hypothèse qu'évoquent ces chercheurs dans un

article de *Science Advances* en 2022... *"Un astéroïde plus gros a pu se morceler sous l'effet gravitationnel de la Terre, menant à deux impacts quasi simultanés. Il a pu également se fragmenter plus en amont dans le Système solaire, auquel cas les impacts auraient été plus espacés dans le temps"*, détaille Uisdean Nicholson, chercheur à l'université d'Édimbourg et auteur principal de l'article. La possibilité qu'il s'agisse de

deux impacts non apparentés n'est cependant pas écartée, car les datations basées sur les données sismiques s'accompagnent d'une grande incertitude, de l'ordre d'un million d'années. *"Pour affiner nos estimations, nous devons forer au niveau du cratère"*, admet le chercheur. Une opération en milieu sous-marin, très coûteuse, qui ne pourra potentiellement se concrétiser qu'à l'horizon 2025.

surplombe encore l'atmosphère. Sous la puissance du choc, les immenses quantités de roches qui le composent se compressent pendant quelques secondes sur la moitié de leur volume. Puis l'impact creuse un bol d'environ 30 km de profondeur et 100 km de diamètre dans la croûte terrestre, repoussant de la matière sur les côtés. C'est comme un caillou jeté dans une mare : à ces niveaux de pression et de température titanesques, le comportement de la roche s'apparente à celui d'un fluide visqueux ! Par réaction, de la roche venant de la partie inférieure de la croûte terrestre, au fond du bol, remonte alors rapidement au niveau du centre de l'impact... et le dépasse sur près de 10 km

de hauteur – plus haut que l'Everest ! *"Imaginez cette montagne se dresser en 180 secondes"*, souffle Gareth Collins. Puis celle-ci s'effondre sur elle-même pour former, deux minutes plus tard, un disque plat couvert de matière en fusion, dont les bords sont surélevés par rapport à l'extérieur du cratère – le fameux *peak ring*.

### HIVER D'IMPACT

Reste à comprendre comment ce choc, qui aurait pu rester régional, se transforme en cataclysme mondial. Cette question intrigue les chercheurs depuis longtemps : *"Une poignée d'autres cratères de taille comparable à Chicxulub ont été identifiés sur Terre sans*

Le 6 août 1945, la bombe atomique vient de s'abattre sur Hiroshima. Avec sa puissance équivalente à 15000t de TNT, elle fait plus de 100000 victimes. À Chicxulub, la puissance dégagée par l'impact équivaut à 5 milliards de fois celle de Hiroshima...



qu'ils soient pour autant corrélés avec des épisodes d'extinction de masse connus", rappelle Gareth Collins. La réponse tient aux milliards de tonnes de matériaux pulvérisés dans l'atmosphère par l'impact – quelque 200 000 km<sup>3</sup> de roches, selon des estimations récentes. Quantité de gaz et de particules fines, riches en soufre notamment, sont alors éjectés dans les parties hautes de l'atmosphère, bloquant durablement les rayons du soleil, et plongent la planète dans un effroyable "hiver d'impact". "L'endroit et la configuration de l'impact ont forcément joué un rôle décisif dans ce cataclysme", avance Gareth Collins. Des recherches antérieures ont en effet montré que les roches locales sont particulièrement riches en soufre. "Seul un septième de la surface terrestre de l'époque recèle ces taux élevés de matière soufrée, il y avait donc une chance sur sept pour que l'impact ait ce type de conséquences", s'exclame-t-il. Mais pour le chercheur, l'angle d'attaque de l'astéroïde doit également être pris en compte : "Les simulations montrent que cet angle influe sur la quantité de matière éjectée." Une chute verticale génère en effet beaucoup de particules, sans leur communiquer suffisamment de vitesse pour les envoyer dans l'atmosphère. Au contraire, un angle très incliné arrache peu de matière, mais avec des vitesses très importantes. "L'angle de 45° à 60° que nous

proposons est optimal pour arracher à la fois beaucoup de matière et lui communiquer la vitesse nécessaire pour occuper durablement les hautes couches de l'atmosphère", estime le chercheur... qui en conclut que les dinosaures ont bien été confrontés à un scénario du pire. ■

## L'ASTÉROÏDE EST-IL TOMBÉ AU PRINTEMPS?

Alors que les datations géologiques sont sujettes à une certaine marge d'incertitude, la conclusion de l'étude publiée dans *Nature* en 2021 par Mélanie During, chercheuse à l'université d'Uppsala (Suède), est étonnante de précision: l'impact de Chicxulub aurait eu lieu au printemps dans l'hémisphère Nord! Pour y parvenir, son équipe s'est penchée sur des fossiles de poissons tués le jour de l'impact et exceptionnellement conservés, issus du site de Tanis (voir p. 48). L'analyse de la composition chimique de leurs os – plus précisément les isotopes de carbone qu'ils contiennent – a révélé que ces animaux sont

morts lors d'un pic de croissance cyclique correspondant à une abondance de nourriture, typique du printemps. Selon Mélanie During, ce timing particulier a pu avoir des conséquences d'ordre sélectif: alors que la majorité des espèces de l'hémisphère Nord auraient été balayées par le cataclysme au moment où elles étaient en recherche de nourriture, celles de l'hémisphère Sud, en train de se préparer pour la nidification hivernale, auraient bénéficié d'une légère chance de survie supplémentaire. "Cela explique peut-être pourquoi les écosystèmes se sont rétablis plus rapidement dans l'hémisphère Sud", avance la chercheuse.

# ABONNEZ-VOUS À SCIENCE & VIE

## ET PROFITEZ DE TOUS VOS ACCÈS ET PRIVILÈGES ABONNÉS

12 numéros par an

Un accès exclusif et illimité  
au site et à l'appli



- ✓ Consultez plus de 15 ans d'archives
- ✓ Plus de 50 contenus exclusifs par semaine
- ✓ **SCIENCE&VIE TV** le replay et le streaming
- ✓ Inscription gratuite aux événements en visioconférence
- ✓ Retrouvez le magazine et ses hors-séries thématiques en version numérique à consulter sur **KiosqueMag**



L'OFFRE 1 AN

**65€90**  
seulement  
au lieu de ~~107€17\*~~

**SCIENCE & VIE** LA RÉFÉRENCE

**BULLETIN D'ABONNEMENT** Complétez le formulaire et le retourner sous enveloppe affranchie à : Science et Vie Abonnements - 59898 Lille cedex 9

1 Je choisis mon offre d'abonnement et mon mode de paiement :

# M030 # D1510858

**L'OFFRE 1 AN** - 12 N° par an <sup>(1)</sup>  
**65,90€/an + l'accès au site**  
**Science & Vie (dont TV) au lieu de 107,17€\***

**-38%**

**L'OFFRE LIBERTÉ** - 1 N° tous les mois <sup>(2)</sup>  
**5,50€/mois + l'accès au site**  
**Science & Vie (dont TV) au lieu de 8,93€**

**-38%**

mon abonnement se renouvellera automatiquement à date anniversaire sauf résiliation de ma part.  
Je remplis le mandat ci-dessous accompagné de mon RIB ou je joins un chèque (sans scotch ni agrafe)  
à l'ordre de Science & Vie.

1 | 1

Je remplis le mandat ci-dessous accompagné de mon RIB.  
Après la première année, je serai prélevé de 6,90€.

1 | 2

Je complète l'IBAN ci-dessous à l'aide de mon Relevé d'identité Bancaire (R.I.B)

IBAN :

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines.  
Créancier : Reworld Media Magazines, 40 Avenue Aristide Briand, 92220 Bagneux France.

Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479.

Date :  /  /   
Signature obligatoire :

**Plus rapide, simple et 100% sécurisé !**

scannez le QR code  
ou rendez-vous sur  
[bit.ly/promo-page-svhs-310](http://bit.ly/promo-page-svhs-310)



Le prix de référence à l'année se compose du prix kiosque (38,00€), des frais de port (6,97€). (2) Offre sans engagement : je peux résilier à tout moment sur simple appel ou par courrier au service client. Après 1 an, je serai prélevé de 6,90€ par mois. (1) Offre avec engagement : abonnement annuel automatiquement reconduit à date d'anniversaire. Le règlement s'effectue en une seule fois. Vous serez informé par écrit dans un délai de 3 mois avant le renouvellement de votre abonnement. Vous aurez la possibilité de l'annuler 30 jours avant la date de reconduction auprès du service client. A défaut l'abonnement sera reconduit pour une durée identique à votre abonnement initial. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur [kiosquemag.com](http://kiosquemag.com) et contacter le service client par mail sur [serviceabomag.fr](mailto:serviceabomag.fr) ou encore par courrier à Reworld Media Magazines - Service Client - 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux. Offre réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine valable jusqu'au 31/03/2024. DOM-TOM et autres pays nous consulter. Vous disposez, conformément à l'article L.221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Les informations demandées sont destinées à la société REWORLD MEDIA MAGAZINES (KiosqueMag) à des fins de traitement et de gestion de votre commande, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à [dpd@reworldmedia.com](mailto:dpd@reworldmedia.com). Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - [www.cnil.fr](http://www.cnil.fr). Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com).



2 J'indique les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement (\*\* à remplir obligatoirement)

Nom\*\*  Prénom\*\*

Adresse\*\*

CP\*\*  Ville\*\*

Tél. (portable de préférence)  (Envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email

(Utile pour accéder à votre magazine en numérique et à votre espace client sur [Kiosquemag.com](http://Kiosquemag.com), et gérer votre abonnement)

Date de naissance  /  /  (pour fêter votre anniversaire)

Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande. Dommage!

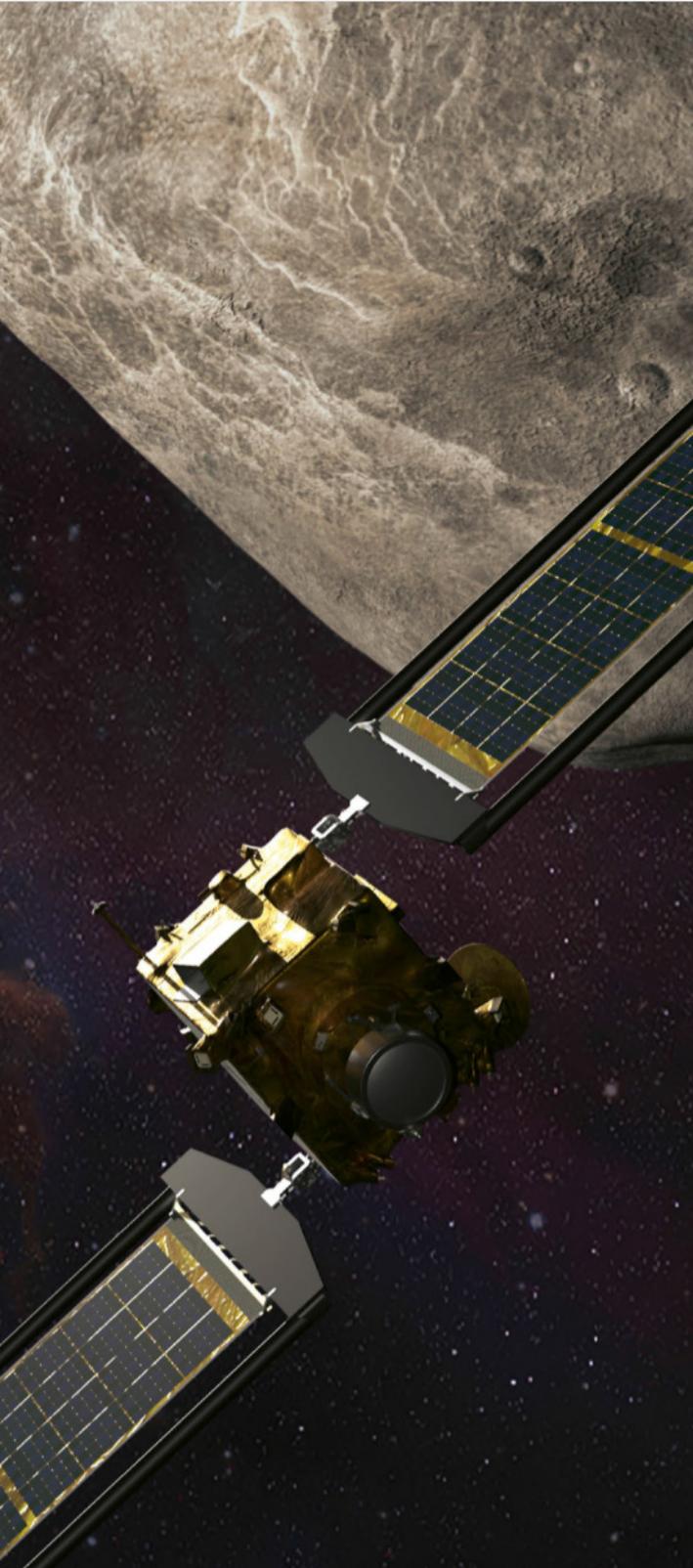
Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage!

# À quand le prochain géocroiseur ?

D'autres astéroïdes menaceront-ils la Terre à l'avenir ? Les chercheurs planchent sur cette angoissante question. En 2022, pour la première fois, la mission Dart a réussi à en dévier un !

PAR HUGO LEROUX

Illustration du vaisseau spatial de la mission de la Nasa, Dart pour Double Asteroid Redirection Test, s'approchant de l'astéroïde Didymos.



**S**eptembre 2022, la mission DART de la Nasa percute de plein fouet l'astéroïde Dimorphos, réussissant à dévier sa trajectoire... ce qui n'est pas une mince affaire, car cet astéroïde de 163 m de diamètre se trouve à quelque 11 millions de kilomètres de la Terre et le vaisseau DART se déplace à 24 000 km/h ! La mission est un succès : *“On a démontré pour la première fois que l'on peut frapper précisément un astéroïde”*, se félicite Pierre Bousquet. Cet ingénieur du Centre national d'études spatiales (Cnes) fait partie du groupe de travail international Space Missions Planning Advisory Group (SMPAG), mis en place par l'ONU pour définir les mesures de défense planétaire contre les menaces des géocroiseurs – c'est-à-dire les astéroïdes évoluant à proximité de la Terre.

#### DES IMPACTS PROBABLES

Car le scénario d'un nouveau cataclysme venu de l'espace est tout à fait possible ! *“On estime qu'un astéroïde de taille supérieure à 1 km frappe la Terre une fois tous les 100 millions d'années (Ma) en moyenne”*, résume le spécialiste. Heureusement, ces gros objets ont tous été identifiés dans le Système solaire. *“Aucun ne risque de nous percuter dans les siècles à venir, aussi loin que nos modèles de propagation d'orbite sont pertinents”*, rassure-t-il. Des catastrophes à l'échelle régionale sont en revanche plus plausibles. À l'instar de l'astéroïde qui a frappé la région de la Tougouska (Sibérie) en 1908. Cet objet de 30 m de diamètre a dévasté une zone de 2000 km<sup>2</sup>, heureusement inhabitée. *“La catastrophe aurait pu être réelle s'il avait frappé Paris ou Pékin”*, rappelle Pierre Bousquet. Or, ces objets de taille inférieure sont loin d'être tous répertoriés ! *“On ne peut pas tous les repérer faute de moyens d'observations spécifiquement dédiés en orbite”*, explique l'ingénieur. C'est pour compléter cette liste que la Nasa compte lancer le télescope Neo Surveyor à l'horizon 2028.

En attendant, c'est la catégorie des objets entre 100 m et 1 000 m, dont seule la moitié serait répertoriée à ce jour – soit un million



d'objets – qui préoccupe le SMPAG. *“Si le géocroiseur est plus petit, on peut envisager d'évacuer la zone. Mais à ce niveau, la catastrophe serait d'échelle nationale, voire continentale. Une déviation apparaît donc comme la meilleure solution”,* résume Pierre Bousquet. D'où la mission Dart. Son principe est... celui de la pétanque : *“L'idée est de venir cogner le géocroiseur pour dévier sa trajectoire et faire en sorte qu'il ne rencontre plus la Terre.”*

Bien que couronnée de succès, la mission a cependant laissé un certain nombre de questions en suspens. *“D'abord, nous devons comprendre pourquoi la mission a mieux marché que prévu. En effet, nous avons réduit la période de révolution de Dimorphos autour de son astéroïde parent, Didymos, de 33 minutes... bien au-delà des 7 minutes attendues”,* pointe Patrick Michel, astrophysicien et co-investigateur scientifique

**Explosion de joie de l'équipe de commandement de la mission Dart, le 26 septembre 2022. Lancé à une vitesse de 23 700 km/h, le petit vaisseau spatial de 550 kg vient de heurter avec succès l'astéroïde Dimorphos, après un voyage commencé le 24 novembre 2021.**

de la mission Dart. La seconde question concerne l'état actuel de Dimorphos. *“Nous ne savons pas si l'impact a produit un cratère de surface, ou s'il a entièrement déformé l'astéroïde.”* Or, lever ces incertitudes est primordial pour ajuster d'éventuelles missions de déviation futures.

C'est l'objectif de la mission Hera, conçue par l'Agence spatiale européenne (Esa). Son lancement aura lieu le 7 octobre 2024, avec une arrivée prévue sur Dimorphos, fin 2026. Cette sonde assortie de deux nanosatellites embarquera un spectromètre infrarouge et un altimètre pour caractériser la surface de l'astéroïde, ainsi qu'un radar pour analyser la structure interne de Dimorphos. De quoi mieux comprendre sa composition et déduire la quantité de mouvement réellement transmise par Dart.

## David contre Goliath

Plus petit que la tour Eiffel mais plus grand que la pyramide de Khéops, l'astéroïde Dimorphos a vu son orbite déviée par l'engin spatial de 19 m (panneaux déployés) de la mission Dart.

Bus  
14 mètres

Vaisseau Dart  
19 mètres

Arc de triomphe  
49 mètres

Statue de la Liberté  
93 mètres

Grande pyramide  
de Gizeh  
139 mètres

Dimorphos  
163 mètres





À plus long terme, les experts ont les yeux tournés vers l'astéroïde Apophis, qui va frôler la Terre à quelque 31 000 km, en avril 2029. Deux projets de mission, Ramsès et Droid, conçus respectivement par l'Esa et le Cnes, visent à profiter de ces conditions exceptionnelles pour étudier cet objet de 340 m de diamètre et augmenter notre connaissance des astéroïdes. De quoi nourrir les réflexions des scientifiques avant qu'un gros géocroiseur ne vienne réellement menacer la Terre. Le candidat le plus probable est l'astéroïde Bennu : celui-ci aura 1 chance sur 2 700 de frapper la Terre... en 2182. ■

**Didymos**  
780 mètres

**Burj Khalifa**  
830 mètres



**Tour Eiffel**  
321 mètres

**One World Trade center**  
546 mètres



# LA

© JOHN R. FOSTER/SPL

Voici 66 millions d'années, un astéroïde s'écrase au nord du Yucatán. L'illustrateur a ici choisi de représenter les nuées de poussières projetées dans la haute atmosphère par l'impact.

# CATASTROPHE



ROBERT DEPALMA

# “À Tanis, nous décodons ce qui a mis fin au Crétacé”

Fossiles de dinosaures inconnus, poissons entiers, tissus mous, arbres calcinés... Le chantier de Tanis, dans le Dakota du Nord, offre un instantané du cataclysme. Le paléontologue Robert DePalma, explorateur du site depuis 2012, revient sur cette découverte qui bouleverse notre compréhension de l'impact de Chicxulub.

PAR MATHIAS CHAILLOT

**SVHS:** Comment avez-vous entendu parler de Tanis et qu'est-ce qui vous a intrigué dans ce site ?

**Robert DePalma :**

La première mention de ce site vient d'un groupe de paléocollecteurs dirigé par l'archéologue Steve Nicklas, "Paleo Prospectors". Ils pensaient qu'il s'agissait autrefois d'un étang et j'ai immédiatement été intrigué par le potentiel de préservation exceptionnel des



sédiments à grains fins, capables de préserver des détails rares des écosystèmes du Crétacé, dans de nombreux cas en trois dimensions. J'ai alors compris que ce n'était pas un étang, mais plutôt le résultat d'un dépôt rapide, semblable à une crue le long d'une rivière, ce qui ajoute au potentiel de préservation. Ces facteurs à eux seuls en faisaient une opportunité d'études de niveau mondial, même sans connaître le lien avec la fin du Crétacé.



Tanis, Dakota du Nord

**SVHS:** Quelles sont les caractéristiques de cette strate géologique et comment avez-vous compris qu'elle coïncidait avec l'impact de Chicxulub ?

**R.D.:** Il était clair que le dépôt était dû à un déferlement rapide. Le fait que les délicats

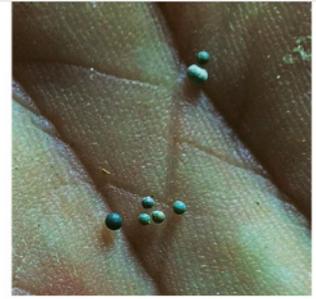


Robert DePalma en plein travail sur le site de Tanis, où la stratigraphie rend compte de l'orientation de la vague qui a déferlé ici il y a 66 Ma.

débris biologiques aient été retrouvés sur toute l'épaisseur du dépôt constitue la preuve d'un événement unique. Ensuite, des indicateurs tels que les traces de stratification et l'orientation des débris nous ont donné la direction de cette vague... qui venait de l'est, soit le sens opposé de l'écoulement de la rivière. Cette thèse d'une vague venant de l'est, depuis la mer intérieure occidentale qui divisait les États-Unis à cette époque géologique, a été soutenue par la découverte

de créatures marines dans le gisement : des dinoflagellés [*micro-organismes eucaryotes unicellulaires dotés de flagelles*, NDLR] et des foraminifères marins microscopiques [*organismes protozoaires unicellulaires dotés d'une coquille*, NDLR], des dents de requin et des mollusques. La surprise est aussi venue de la découverte, dans tout le gisement, de minuscules sphérules rondes d'éjecta, un type de débris liés à l'impact. L'empreinte géochimique et les mesures radiométriques

de ces éjecta correspondaient à celles de Chicxulub. Le site est par ailleurs recouvert d'une couche de poussière couleur pêche provenant des retombées d'impact : la fameuse argile qui marque la limite Crétacé-Paléogène. C'est cette couche enrichie en iridium qui a conduit Walter Alvarez, son père Luis et d'autres chercheurs à proposer l'hypothèse de l'impact dans les années 1980. Elle représente un moment précis dans la datation géologique et elle est présente



À gauche, Robert DePalma examine la couche contenant les éjecta, dont des sphérules de verre de 1 mm de diamètre (en haut). Ci-dessus, une micrographie électronique à balayage d'une des sphérules.

dans le monde entier. Le fait qu'elle recouvre le site signifie que le dépôt contenant les éjecta s'est formé après l'impact, mais avant que les débris poussiéreux ne le recouvrent, soit dans une fenêtre de temps très courte. De nombreuses sciences, de la biostratigraphie [étude des fossiles en lien avec les couches géologiques, NDLR] à la palynostratigraphie [étude du pollen, NDLR], en passant par la lithostratigraphie [étude de la superposition des strates géologiques, NDLR], la géochimie et la géochronologie,

ont ainsi permis d'établir la chronologie du site.

**SVHS: Cette chronologie est maintenant très fine. Après avoir pensé que Tanis avait été formé par le tsunami dû à l'impact, vous avez finalement proposé l'idée d'une seiche, une vague provenant d'un milieu aquatique clos et provoquée par un tremblement de terre. Pourquoi ?**

**R.D. :** La sédimentologie et la stratigraphie du site répondaient à tous les principaux critères de diagnostic des

ondes de type tsunami, car le dépôt de crue était incompatible avec les types d'inondations qui auraient pu se produire plus fréquemment, comme les crues de rivières ou les dépôts de tempête. Puis la direction de la crue a montré que ce n'était pas une crue normale de rivière. Il semblait de plus en plus évident que cela était lié d'une manière ou d'une autre à l'impact. Ce type de vagues est rare et dans toute l'histoire géologique de la formation de Hell Creek [formation à laquelle appartient Tanis, datant du Crétacé supérieur et riche en fossiles, NDLR], une inondation de ce type n'a été documentée qu'une seule fois : à Tanis. Elle forme une couche fossile appelée Konservat-Lagerstätte [les gisements à conservation exceptionnelle, NDLR].

La préservation des fossiles qui en résulte ne ressemble à rien de ce qui existe dans le reste de la formation, avec des poissons entiers, des traces de tissus mous et des détails de structures biologiques qui faciliteront la recherche pour les décennies à venir.

**SVHS:** *Les éjecta vous ont-ils permis de connaître le moment précis de la formation de Tanis ?*

**R.D.:** En effet. Cela tient en partie aux estimations des heures d'arrivée des éjecta fournies par le Dr Walter Alvarez. Ils sont tombés sur le



site dans les premières heures après l'impact, ce qui était trop tôt pour qu'un tsunami traditionnel puisse y parvenir depuis Chicxulub. Alors on s'est demandé : qu'est-ce qui est arrivé d'autre ? Et l'une des réponses est l'énergie sismique de l'impact. On sait que ces ondes sont arrivées dans la région d'étude à peu près en même temps que le dépôt de sédiments. Il est donc probable qu'elles aient

**L'excellent état de préservation des fossiles permet à l'équipe de Robert DePalma de photographier les éjecta dans les branchies des poissons.**



“ À Tanis, nous avons une vision microtemporelle de la façon dont les organismes ont subi cet impact, la façon dont tel poisson a disparu ce jour-là ”

joué un rôle dans le déclenchement de l'inondation.

**SVHS:** *Pourquoi avoir baptisé ce site Tanis ? Beaucoup pensent qu'il s'agit d'une référence à Indiana Jones, là où le héros pense trouver l'Arche d'alliance...*

**R.D.:** De nombreux médias prétendent avoir compris notre raisonnement sur ce point, ce qui est bien dommage, car leur explication est rarement juste ! En réalité, il existe une véritable ville égyptienne antique appelée Tanis. Il y a été découvert un artefact qui, combiné à la pierre de Rosette, a été essentiel au décodage de l'ancienne langue hiéroglyphique égyptienne. Parce que le site de Tanis contenait de nombreux détails potentiellement passionnants pour la recherche, nous avons pensé qu'il pourrait, de la même manière, aider à décoder la vie à la fin du Crétacé et l'événement qui a provoqué cette fin.

**SVHS:** *Si vous deviez résumer la diversité de ce que vous avez découvert à Tanis, que citeriez-vous en particulier ?*

**R.D.:** “Diversité” est clairement le mot qui définit le mieux le matériel trouvé



**Robert DePalma et son assistante Kylie Ruble travaillent à l'extraction d'une plaque de fossiles contenant plusieurs carcasses. Afin de les protéger des assauts de l'atmosphère, ils recouvrent le bloc isolé d'aluminium et de bandes de plâtre. Ainsi protégé, le bloc de fossiles rejoindra le laboratoire.**

à Tanis, mais sortir un aspect plus important que les autres est un réel défi. Le site contient une multitude d'informations sur la vie à la fin du Crétacé : des animaux et plantes dont on sait très peu de choses, jusqu'aux nouvelles espèces, ce qui est primordial pour comprendre comment l'impact a affecté cette vie. Nous y avons également une vision micro-temporelle de la façon dont les organismes ont subi cet impact, pas seulement en

tant qu'espèce, mais aussi au niveau individuel : comment tel poisson a disparu ce jour-là, ou qu'est-ce que cette tortue particulière a pu vivre ? Une deuxième opportunité majeure consiste à utiliser les informations provenant des éjecta pour mieux comprendre la dynamique de l'événement d'impact lui-même. Enfin, une grande variété d'organismes vertébrés, végétaux et invertébrés ont été découverts, tous nouveaux pour la science.

**SVHS :** *Les fossiles sont particulièrement fragiles à Tanis. Comment faites-vous pour les extraire intacts ?*

**R.D. :** Les fossiles de Tanis sont très sensibles en partie à cause de la matrice d'argile smectique molle [une argile particulièrement collante riche en silicates, ndlr] dans laquelle ils sont conservés. Les changements d'humidité atmosphérique ou de température peuvent gravement les endommager, même après les avoir saturés de produits chimiques de conservation. Et lorsque cette roche est exposée à l'air libre et sèche naturellement, c'est



Sur cette section transversale du gisement de Tanis, on distingue la variété des organismes marins qui ont été piégés par la vague consécutive à l'impact de la météorite.

comme regarder un vampire se réduire en poussière au soleil... Ainsi, diverses techniques de préservation ont été reproduites pour assurer la stabilisation des fossiles, depuis l'utilisation de différents polymères liquides jusqu'aux résines et composés tels que le polyéthylène glycol. La première étape consiste à délimiter le bloc de fossiles à retirer. Après la stabilisation initiale, le bloc est recouvert d'une feuille d'aluminium, puis de bandages en plâtre, de poutrelles

de renforcement et il est retiré pour être transporté au laboratoire où il reçoit des composés conservateurs supplémentaires pendant le processus de séchage.

#### **SVHS: Tanisa-t-il révélé tous ses secrets ?**

**R.D. :** Il reste encore beaucoup de choses à découvrir. Une équipe internationale de chercheurs m'a accompagné dès le début, et continuera à le faire. À chaque saison de fouilles, des dizaines de chercheurs d'autres institutions

se sont rendus sur le site pour l'examiner ou mener leurs propres travaux. Cela inclut un grand nombre d'étudiants et de stagiaires. L'un d'entre eux vient tout juste de recevoir son doctorat pour ses travaux menés à Tanis, et plusieurs autres sont en passe d'obtenir des diplômes supérieurs de la même manière. L'avenir du site repose donc sur une forte composante humaine. La beauté de Tanis ne réside pas seulement dans la science, mais aussi dans le travail collaboratif et l'esprit de réseau qui s'y développent. ■

# Le récit de l'apocalypse

Voici 66 millions d'années, l'enfer se déchaîne à Tanis, à 3 000 km de Chicxulub. Les dernières découvertes scientifiques dans la formation de Hell Creek permettent de dresser un tableau de plus en plus précis des heures et même des minutes qui suivent l'impact de la météorite. PAR ARMELLE CAMELIN



**C**e jour resterait comme le plus terrible de l'histoire de notre planète. Quelques heures d'une violence inouïe qui allaient effacer 150 millions d'années d'évolution et engager la vie sur un nouveau chemin. T. Rex en a été le témoin. Lorsque la meute s'est réveillée ce matin-là, il y a 66 millions d'années, en ce qui serait le dernier jour du Crétacé, tout semblait normal à Hell Creek. (...) C'est alors que tout est devenu bizarre. Plus bizarre encore que jamais auparavant dans l'Histoire de la Terre... Dans son livre *Le Triomphe et la chute des dinosaures* (2021, éd. Quanto), Steve Brusatte, paléontologue américain et professeur à l'université d'Édimbourg, se place du côté des dinosaures pour faire le récit de l'apocalypse. Ceux qu'il décrit vivent à Hell Creek, soit à 3000 km du lieu de l'impact...

Depuis les années 1980 et la formulation de l'hypothèse de l'impact météoritique par le paléontologue Walter Alvarez, la limite Crétacé-Paléogène est l'une des périodes de l'histoire de la Terre les plus documentées.

Ces dix dernières années, les études sur les conséquences immédiates de l'impact ont été nombreuses. Dans ce dossier, nous nous intéressons plus particulièrement au gisement fossilifère de Tanis découvert dans la formation de Hell Creek aux États-Unis. Nous documentons également les résultats de l'Expédition 364 qui a procédé, en 2016, au forage de l'anneau central du cratère de Chicxulub, au Mexique. Nous décrivons les incendies, les séismes, les tsunamis et tous les mouvements de sédiments générés par la collision en nous appuyant sur les études les plus récentes. *“Les résultats et les tendances à long terme de l'impact de Chicxulub et de l'extinction de masse sont bien connus”,* rappelle Robert de Palma, qui travaille sur la formation de Tanis. *“Mais les informations à l'échelle de la minute ou de l'heure juste après l'impact font cruellement défaut. Or, il est intéressant d'appréhender comment les premiers effets sur le biote terrestre – et la façon dont l'enregistrement microtemporel de ces premiers effets s'intègre –, influencent les conséquences à plus long terme que nous connaissons.”*

T + 1 MINUTE

# LE CRATÈRE SE FORME

**"ET TOUT D'UN COUP, UN FLASH. SANS UN BRUIT. UN ÉCLAIR JAUNE, UNE FRACTION DE SECONDE QUI A ILLUMINÉ LE CIEL TOUT ENTIER ET LAISSÉ LES T. REX HÉBÉTÉS QUELQUES INSTANTS". Steve Brusatte.**

**V**oilà 66 millions d'années (Ma), le Yucatán est une plateforme immergée assez peu profonde, entre -20 m et -50 m. La partie la plus superficielle de la roche est composée de carbonates et d'évaporites,  $\text{CaCO}_3$  et  $\text{CaSO}_4$ . En dessous, le socle du Yucatán est composé de granit et de gneiss d'âges différents, allant du Jurassique au Protérozoïque. "Il y a des dinosaures dans les parages : des reptiles marins, des reptiles volants qui se baladent là tout autour, et ça doit faire un énorme choc, détaille le chercheur Philippe Claeys. Quand on a un impact d'un projectile comme celui-ci, on peut quasiment voir ça comme équivalant à une explosion nucléaire en un point bien précis, peu importe l'angle de l'impact."

L'étude de référence sur la formation du cratère de Chicxulub est publiée en septembre 2019 dans la revue *Pnas* (*Proceedings of the National Academy of Sciences*). Elle est menée par Sean Gulick, chercheur spécialisé en géologie et processus tectonique au sein de l'université du Texas à Austin. Pendant deux mois, en 2016, Sean Gulick et ses équipes, installés sur une plateforme en mer, ont procédé à un forage dans les eaux peu profondes du cratère de Chicxulub. Près de 300 carottes de forage ont été récupérées et ont permis, entre autres, de comprendre comment la Terre a réagi à l'impact de la météorite, il y a 66 Ma.

"La formation du cratère dans son ensemble dure une dizaine de minutes", décrit Philippe Claeys, lui aussi signataire de l'étude de *Pnas*. "Au moment de l'impact, un cratère circulaire se forme. Une onde de choc à très haute énergie se propage immédiatement dans la cible et joue un rôle d'ouverture. En même temps, il y a une réverbération de l'onde de choc dans le projectile qui, lui, est quasiment entièrement vaporisé dans l'atmosphère et au-delà."

Du côté de la croûte terrestre, les roches sont à la fois fondues et vaporisées. Rapidement, en s'enfonçant, l'onde perd de sa puissance. "Ça descend vite, précise le chercheur. On estime en général que la profondeur d'excavation pour un projectile sur





“ Une onde de choc à très haute énergie se propage immédiatement dans la cible. En même temps, le projectile est entièrement vaporisé dans l’atmosphère et au-delà ”

Terre serait de deux fois – trois fois au maximum – le diamètre du projectile. Donc on va dire qu’on va excaver la croûte terrestre sur à peu près 20 km, peut-être 25 km.” Le premier cratère ainsi creusé est temporaire. Il s’ouvre jusqu’au moment où l’onde de choc perd sa capacité excavatrice pour devenir une onde sismique classique.

### ROCHE FLUIDIFIÉE

À ce stade, l’onde n’est plus capable de vaporiser la roche. Elle la fait seulement fondre. “Au moment où l’excavation s’arrête, explique le chercheur, la première phase de la formation du cratère est terminée. Il a alors un diamètre de 100 km pour 20 km de profondeur.” Toutes les roches de ce cratère, selon leur type et l’endroit où elles se trouvent, ont été vaporisées, fondues, bréchifiées, cassées, choquées, fracturées. “Tout de suite après, le cratère se modifie : les roches sous pression tout au fond du cratère remontent. Elles ont été comprimées sous l’effet de l’onde de choc et vont se relâcher et se comporter vraiment comme un fluide”, décrit le chercheur.

Ce principe de roche “fluidifiée”, Philippe Claeys n’y a pas toujours cru. “C’était un modèle porté d’abord par des expérimentalistes qu’en tant que géologue de terrain j’avais du mal à imaginer. Et pourtant, quand on a foré le cratère en 2016, on a pu

constater dans les centaines de mètres de carottes récupérées, que le granit était complètement altéré, choqué, rendu friable.” Certaines carottes révèlent la présence de roche fondue (melt), injectée dans le granit. “Les recherches en géologie structurale sur les échantillons ont confirmé l’hypothèse : pendant trente secondes à deux minutes, le granit est devenu une roche fluide, pas un magma, mais bien une roche qui avait perdu de sa cohérence et est remontée pour former le pic central du cratère.”

En même temps que ces roches fluidisées remontent, des failles se forment sur les côtés. Elles conduisent à l’effaissement, un peu en escalier, de la zone centrale du cratère. “Après ça, le cratère actuel d’un diamètre de près de 200 km est formé, conclut Philippe Claeys. Ça a duré dix minutes. Il va encore y avoir de nombreux réajustements : des tremblements de terre, des failles actives, mais toute l’histoire de la formation du cratère est terminée.”

Au sein de la zone proximale de l’impact, c’est-à-dire à moins de 1 500 km, le rayonnement thermique de l’événement, l’onde de choc infrarouge, carbonise tout sur son passage. “Par effet micro-ondes, tout ce qui est aux alentours du Mexique brûle, décrit le chercheur. Si l’on s’éloigne un peu, on sentira une onde de chaleur. Et si l’on se place encore plus loin, on ne sentira que l’onde sismique.”

T + 5 MINUTES

# UN SÉISME GÉANT

**"LES OISEAUX ET LES RAPTORS VOLANTS S'ÉTAIENT TUS ET LE SILENCE ÉTAIT MAINTENANT TOTAL SUR HELL CREEK. LE CALME N'A DURÉ QUE QUELQUES INSTANTS. CAR LE SOL S'EST MIS À GRONDER SOUS LEURS PATTES. PUIS À TREMBLER. ET À ONDULER. COMME DES VAGUES. DE VIOLENTES PULSATIONS SISMIQUES ONT SECOUÉ LES ROCHES ET LES TERRES, FAISANT S'ÉLEVER ET RETOMBER LE SOL COMME SI UN SERPENT GÉANT S'ÉTAIT GLISSÉ DESSOUS. TOUT CE QUI N'ÉTAIT PAS ENRACINÉ A ÉTÉ PROJETÉ DANS LES AIRS, AVANT DE RETOMBER ET D'ÊTRE PROJETÉ À NOUVEAU. LA SURFACE ÉTAIT DEVENUE UN VASTE TRAMPOLINE. LES PLUS MODESTES CRÉATURES -PETITS DINOSAURES, MAMMIFÈRES ET LÉZARDS- ONT ÉTÉ VIOLEMMENT CATAPULTÉES AVANT DE RETOMBER EN S'ÉCRASANT CONTRE LES ARBRES ET LES ROCHES. LES VICTIMES DANSAIENT DANS LES AIRS COMME DES ÉTOILES FILANTES. MÊME LES T. REX LES PLUS GRANDS ET LES PLUS LOURDS DE LA MEUTE, CEUX DE 12M OU PLUS, ONT ÉTÉ PROJETÉS À PLUSIEURS MÈTRES DE HAUTEUR." Steve Brusatte.**



**L**e séisme à la magnitude la plus élevée jamais enregistrée sur l'échelle de Richter a eu lieu en 1960, dans le sud du Chili. Sa magnitude était de 9,52. Celui qui propulse dans les airs *Tricératops* et *T. Rex* est probablement de l'ordre de 11 ou 12 sur cette même échelle. Des glissements de terrain colossaux rayent collines, lacs et canyons de la carte...

L'onde sismique très forte se propage sur la planète. Elle provoque la formation de seiches partout sur le globe : il s'agit d'oscillations du niveau d'une nappe d'eau, de petites vagues comparées à un tsunami, mais dont la force fait quand même bouger tout ce qui est instable. Tous les sédiments sont bousculés. C'est probablement sous l'action d'une seiche que le gisement fossilifère de Tanis a été recouvert de sédiments



et que la fossilisation a pu avoir lieu. “Le séisme de 2011 au Japon a créé des mouvements d’eau dans les fjords norvégiens, rappelle Philippe Claeys. Il s’est passé la même chose il y a 66 Ma. Sauf que l’onde sismique était encore plus forte. Je vais exagérer, mais, pour bien comprendre ce qui se passe à ce moment-là, il faut s’imaginer que l’on prend la Terre et qu’on l’agite, qu’on la secoue.”

“ Il faut s’imaginer que l’on prend la Terre et qu’on l’agite, qu’on la secoue ”

T + 30 MINUTES

# UNE PLUIE D'ÉJECTA



**"LORSQUE LES SECOURSSES ONT CESSÉ ET QUE LE SOL S'EST DE NOUVEAU IMMOBILISÉ, LA PLUPART DES TYRANNOSAURES GISAIENT AU BORD DE LA RIVIÈRE COMME SUR UN CHAMP DE BATAILLE. [...] C'EST ALORS QUE LES PLUIES SE SONT ABATTUES. MAIS CE N'ÉTAIT PAS DE L'EAU QUI TOMBAIT DU CIEL. C'ÉTAIT DES PERLES DE VERRE ET DES MORCEAUX DE ROCHE INCANDESCENTS. CES DÉBRIS DE LA TAILLE D'UN POIS ONT FRAPPÉ LES DINOSAURES ENCORE EN VIE ET LEUR ONT INFLIGÉ DE PROFONDES BRÛLURES." Steve Brusatte.**

**D**ans son livre, Steve Brusatte fait référence à des sphères de verre d'impact. Ce sont des billes, de 200 µm à 2 mm de diamètre, formées par un mélange de fragments de roches en fusion arrachée à la croûte terrestre. "Au moment de l'impact, tout un éjecta, tout un jet de matière a été vaporisé dans l'atmosphère, décrit Philippe Claeys. Certains éjecta suivent des trajectoires balistiques hors de l'atmosphère puis redescendent sur Terre. On les retrouve à proximité du cratère à moins de 800 km et jusque dans un rayon de 5 000 km de distance.



*Ceux qu'on retrouve à proximité du cratère ont dû mettre environ une demi-heure à arriver, le temps de sortir de l'atmosphère et de revenir. Ceux retrouvés à plusieurs milliers de kilomètres auront plutôt parcouru cette distance en plusieurs heures."*

En 2022, le paléontologue Robert de Palma a retrouvé de nombreuses sphérules dans les branchies de poissons fossilisés sur le site de fouille de Tanis sur lequel il travaille. Il nous raconte cette découverte surprenante : *"Trouver des sphérules d'éjecta dans les branchies des poissons était totalement inattendu, rien de tel n'avait jamais été observé auparavant ! Pendant les premières années*

**Sphérules de matière fondue éjectées du cratère d'impact de la météorite de Chicxulub.**

*de fouilles, en observant les fossiles bien conservés, je me suis demandé ce qui avait bien pu encrasser les branchies des poissons."* Sur le terrain, quand il prélève les poissons fossilisés, les sphérules sont invisibles. Ce n'est qu'après avoir observé les branchies en utilisant la microtomographie aux rayons X, une technique non destructive permettant de retranscrire l'image en trois dimensions d'un échantillon, qu'il découvre la présence de sphérules d'éjecta.

*"Nous avons procédé à une dissection minutieuse 66 Ma post-mortem qui a révélé des sphérules d'éjecta d'impact coincées entre les branchies de la plupart des poissons, poursuit Robert de Palma. C'était sensationnel ! Il était clair que les poissons les avaient aspirées alors qu'elles étaient en suspension dans l'eau et cela est extrêmement important pour nous, car cela signifiait que les poissons étaient encore vivants quand les débris de l'impact sont tombés. C'est une vision dynamique et vivante des événements qui ont suivi l'impact !"*

# T + 35 MINUTES

## LE FEU

**“LA MITRAILLE DE ROCHES VITRIFIÉES A TRANSFÉRÉ SA CHALEUR À L’AIR AMBIANT ET L’ATMOSPHÈRE S’EST ÉCHAUFFÉE AU POINT DE TRANSFORMER LA SURFACE DE LA TERRE EN FOURNAISE.”**

*Steve Brusatte.*

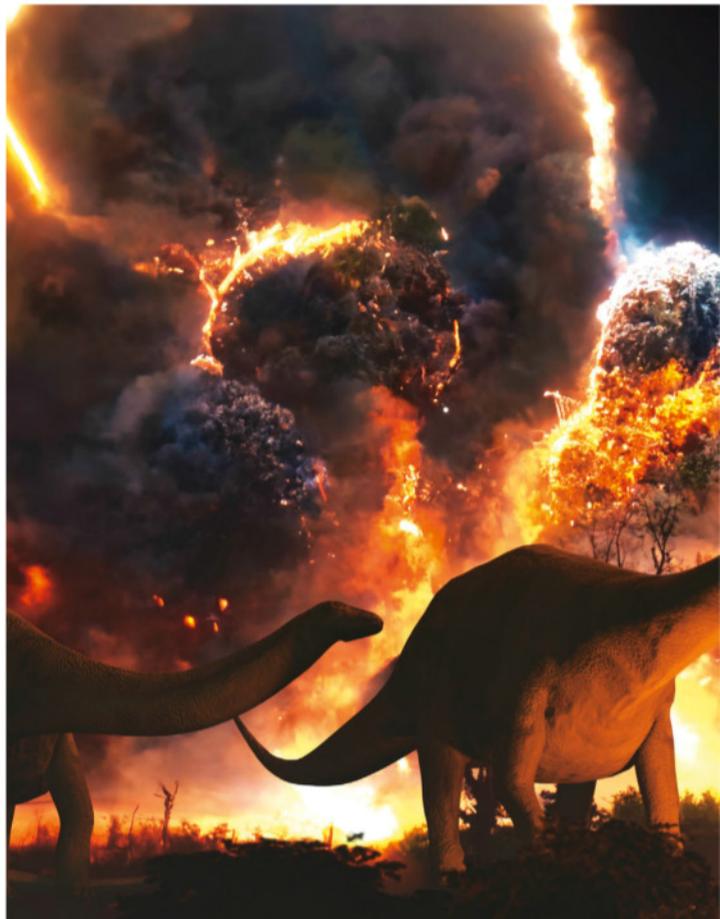
**D**ans un rayon de 1 500 km autour de l’impact de Chicxulub, sous l’effet de l’onde infrarouge générée par la météorite, tout a été carbonisé. Le forage du pic central du cratère de Chicxulub le confirme : *“Nous avons trouvé du charbon de bois dans la carotte de forage au-dessus de l’anneau central, décrit Sean Gulick à la tête de cette expédition. Ce qui serait compatible avec un lavage dans le cratère lors du retour des vagues de tsunami ou peut-être par voie aérienne.”* En clair : le passage des vagues dans le cratère y aurait déposé les restes carbonés des incendies survenus à proximité. Au-delà du périmètre de 1 500 km, les scénarios suggèrent la formation d’incendies ravageurs en tous points du globe. *“Pour faire brûler les forêts de l’autre côté de la planète ou à grande distance, les chercheurs invoquent les éjecta partis sur des trajectoires balistiques, décrit Philippe Claeys. En revenant dans l’atmosphère, les éjecta sont probablement incandescents. S’ils atterrissent dans des savanes sèches, cela risque de provoquer des incendies.”* Peut-on pour autant parler d’un phénomène global ?

Pour Sean Gulick, le rôle du feu dans l’extinction Crétacé-Paléogène (K-Pg) reste *“une question intéressante”*. Philippe Claeys va plus loin en la qualifiant de *“controversée”*. L’hypothèse des incendies est importante, car les poussières de suie sont considérées comme l’un des trois agents meurtriers libérés après l’impact, au côté du soufre et des

poussières de roches. *“En dehors de la zone proximale, les matériaux éjectés du cratère auraient pu provoquer un certain réchauffement de l’atmosphère et la création d’incendies de forêt dispersés, décrit Sean Gulick. Certains soutiennent qu’il s’agit d’un effet mondial majeur, mais je pense qu’aujourd’hui, la plupart des preuves minimisent l’importance de ce processus : des incendies se sont produits, mais ils ne constituent probablement pas un mécanisme majeur d’extinction.”*

### COMBUSTION D’HYDROCARBURES

Claire Belcher, à l’université de Dublin, publie en 2009 une enquête sur les incendies dans laquelle elle révèle les biais des analyses et modèles précédents. *“L’étude des charbons fossiles provenant des roches d’impact de la limite K-Pg a largement fourni des arguments contre l’hypothèse des incendies de forêt, écrit-elle. Il a été démontré que des incendies*



*se produisent tout au long des séquences K-Pg non marines. Mais la quantité totale de matériaux carbonisés dans et autour de la limite K-Pg elle-même est généralement inférieure à la quantité moyenne enregistrée dans les strates du Crétacé ou du Paléogène.”* D’après elle, la suie et les traces abondantes d’hydrocarbures aromatiques polycycliques signalées, en différents points du globe, à la limite K-Pg ont la même signature isotopique que la combustion d’hydrocarbures au niveau du sol. *“La combustion de pétrole est un autre moyen de produire des particules de carbone, explique Philippe Claeys. Or, si l’on regarde ce qu’il y a dans la péninsule du Yucatán, à proximité de l’impact, on peut voir, un peu plus loin au sud-ouest, les grands champs de pétrole mexicain. On avait probablement à l’époque à cet endroit beaucoup de roches très riches en matière organique. Si elles ont été affectées, elles pourraient avoir libéré énormément*

*“ Si les éjecta tombent dans la savane sèche, cela peut donner un incendie ”*

*de poussière de suie.”* Ces dernières auraient alors été attribuées, à tort, à des incendies globaux. Dans son étude, Claire Belcher conclut ainsi : *“Des mécanismes supplémentaires pourraient être nécessaires pour expliquer pleinement les extinctions de K-Pg, parmi lesquels on trouve les effets d’un ‘hiver d’impact’ suivi d’un réchauffement climatique, de pluies acides avec en supplément le stress du volcanisme du Deccan (en Inde). Il est clair que d’importantes perturbations environnementales seraient attendues à la suite de l’impact du K-Pg, même en l’absence d’incendies de forêt étendus.”*



T + 2430

# LE SOUFFLE, LE BRUIT, LA TEMPÊTE



**"DEUX HEURES ET DEMIE APRÈS LE PREMIER FLASH LUMINEUX, LES NUAGES ONT COMMENCÉ À HURLER. LA SUITE DE L'ATMOSPHÈRE S'EST MISE À TOURBILLONNER EN FORMANT DES TORNADES. ET D'UN COUP, LE VENT A DÉFERLÉ SUR LES PLAINES ET LES VALLÉES FLUVIALES AVEC LA FORCE D'UN OURAGAN, D'UNE PUISSANCE TELLE QU'IL A FAIT SORTIR LES LACS ET LES RIVIÈRES DE LEURS LITS. ET AVEC LA TEMPÊTE, LE BRUIT D'UNE DÉFLAGRATION TERRIBLE, BIEN PLUS PUISSANT QUE TOUT CE QUE LES DINOSAURES AVAIENT JAMAIS ENTENDU. PUIS UN AUTRE. LE SON SE PROPAGEANT PLUS LENTEMENT QUE LA LUMIÈRE, C'ÉTAIT LE BRUIT DES EXPLOSIONS SURVENUES LORS DES FLASHS LUMINEUX." Steve Brusatte.**

**I**l est difficile de calculer comment les événements s'enchaînent à 3 000 km du point d'impact et ailleurs sur la planète. Les perturbations environnementales, le bruit de l'entrée de la météorite dans l'atmosphère et de l'impact, ainsi que le souffle de l'explosion se produisent de manière simultanée ou presque. "À ce stade, une situation chaotique s'installe, décrit Philippe Claeys, et elle va durer pendant des semaines, voire des années."

Kerry Emanuel, chercheur et professeur américain de météorologie au Massachusetts Institute of Technology à Cambridge (États-Unis), a inventé un terme pour décrire les tempêtes qui secouent alors la planète : des



hypercanes, soit la contraction de “hyper” et “hurricane”, ouragan en anglais. Les hypercanes sont une classe de cyclone qui se formerait si la température de la surface de la mer était supérieure de 12°C à la température océanique jamais enregistrée. “Les hypercanes, ces ouragans incontrôlables”, écrit Kerry Emanuel, sont capables d’injecter des quantités énormes d’eau et d’aérosols dans la stratosphère moyenne et supérieure, où ils pourraient avoir de profonds effets sur la chimie atmosphérique et le transfert par rayonnement.” D’après les modèles qu’il suggère, les vents s’élèveraient alors à 800 km/h avec des rafales potentielles jusqu’à 970 km/h.

“ Les hypercanes, ces ouragans incontrôlables, pourraient avoir de profonds effets sur la chimie atmosphérique ”

Les pressions modélisées seraient tellement basses que ces tempêtes massives – sans doute de la taille de l’Amérique du Nord – pourraient avoir une durée de vie de plusieurs semaines et plus.



# T + 3 HEURES

## LES TSUNAMIS

**"AU MOMENT OÙ TOUT CELA SE PRODUISAIT DANS L'OUEST DE L'AMÉRIQUE DU NORD, D'AUTRES PHÉNOMÈNES SE DÉROULAIENT AILLEURS DANS LE MONDE. [...] UNE GRANDE PARTIE DE LA CÔTE EST DE L'AMÉRIQUE DU NORD A ÉTÉ DÉVASTÉE PAR DES TSUNAMIS DEUX FOIS PLUS HAUTS QUE L'EMPIRE STATE BUILDING QUI ONT REJETÉ LOIN DANS LES TERRES LES CARCASSES DE PLÉSIOSAURES ET D'AUTRES REPTILES MARINS GÉANTS."**

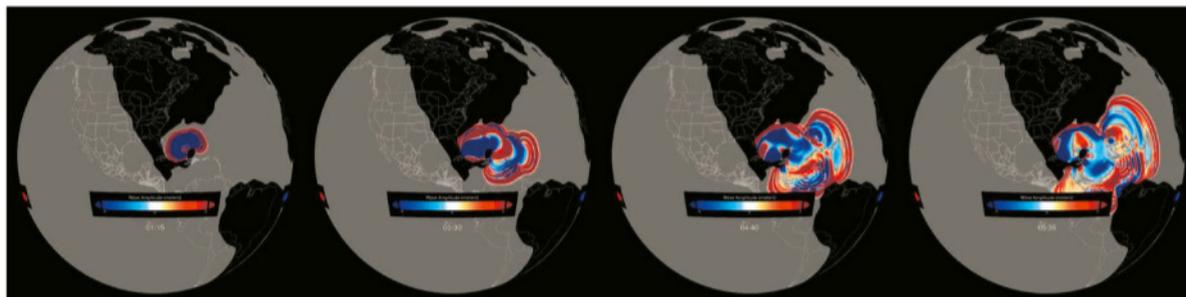
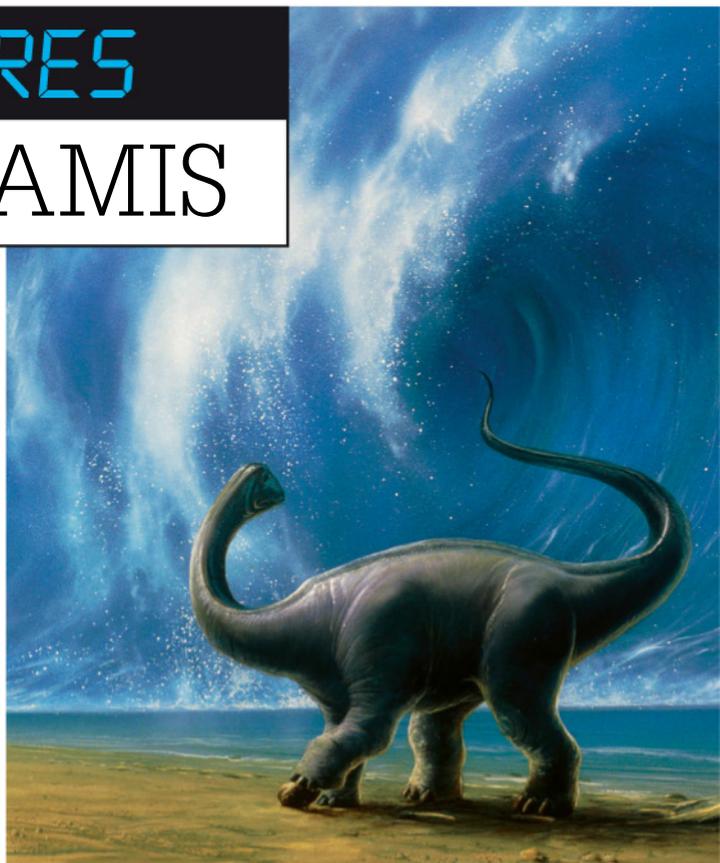
**Steve Brusatte.**

**C**onséquence immédiate des séismes, des tsunamis déferlent sur les côtes du monde entier. Dans un premier temps, les ondes sismiques et l'excavation du cratère poussent l'eau loin de l'impact. Ce souffle initial provoque la formation d'une première vague d'effondrement titanesque : 1500 m de haut lorsqu'elle s'abat sur les côtes. Cette vague a été modélisée pour la première fois en 2022 par des chercheurs de Princeton, du Massachusetts Institute of Technology et de l'université du Michigan, Molly Range et Brian Arbic. *"Nous utilisons un hydrocode pour modéliser le déplacement de l'eau, des sédiments et de la croûte au cours des dix premières minutes, écrivent-ils. Puis un modèle océanique en eaux peu profondes."* D'après

ces modèles, l'impact énergétique du tsunami qui s'est formé à Chicxulub a été jusqu'à 30 000 fois supérieur à celui du tsunami du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien.

### UNE SÉRIE DE VAGUES GÉANTES

Cette première vague monstrueuse se propage dans le golfe du Mexique d'abord, mais aussi vers l'est et le nord-est, dans l'océan proto-Atlantique ainsi que dans l'océan Pacifique accessible au sud-ouest par la voie maritime de l'Amérique centrale, qui existait à cette époque. Quelques minutes après la





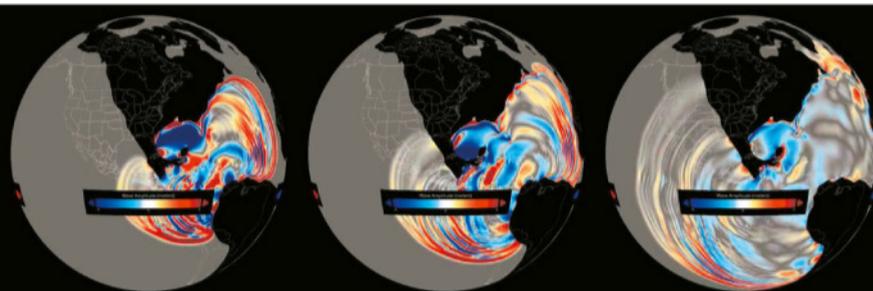
formation de cette vague d'effondrement, l'eau remplit le cratère excavé et un nouveau mur d'eau abrupt revient. Une série de vagues moins importantes se forme – 100 m de hauteur – et se propage à une vitesse de 140 km/h tout autour du globe.

Une autre étude publiée en 2021 par Gary Kinsland, géophysicien de l'université de Louisiane, corrobore ces modélisations. Le chercheur a découvert des mégaondulations fossiles enfouies dans les sédiments de ce qui est aujourd'hui la Louisiane. Pour faire ces observations, Gary Kinsland s'est

procuré les données d'imagerie sismique produite dix ans plus tôt par la corporation Devon Energy, une société d'exploration et de production pétrolière et gazière. En analysant les données, Gary Kinsland et ses collègues ont découvert des rides à la limite K-Pg dont l'orientation suggère qu'elles sont les empreintes des vagues du tsunami parti de Chicxulub. *“Ces mégaondulations sont préservées du fait qu'elles se sont formées sous la base des vagues de tempête et qu'elles ont été enfouies dans les schistes des eaux profondes du Paléocène”*, précise le chercheur.

Quarante-huit heures après l'impact, les vagues de tsunami déferlent sur la plupart des côtes terrestres. À ce stade, le processus de blocage de la photosynthèse est déjà enclenché. Dans une dizaine de jours, le nuage de poussière de roches, de suie et de sulfate se sera étendu et la Terre plongera dans l'obscurité la plus totale. *“Pendant plusieurs années après ce jour terrible, la Terre est restée froide et sombre, la suie et la poussière de roches présentes dans l'atmosphère bloquant la lumière du soleil*, écrit Steve Brusatte. *Avec l'obscurité s'est installé le froid – un hiver d'impact auquel seuls quelques animaux parmi les plus robustes sont parvenus à résister...”* ■

“ Ces mégaondulations ont été enfouies dans les schistes des eaux profondes du Paléocène ”



Un groupe international de chercheurs de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) a combiné la modélisation numérique et l'analyse des archives géologiques pour recréer l'impact global des tsunamis générés par l'astéroïde. L'animation montre l'amplitude des vagues dix minutes après l'impact et jusqu'à quarante-huit heures après.

# UNE NOUVELLE



© RICHARD JONES/SPL

Après l'impact, les forêts incendiées sont remplacées par des maquis de fougères. C'est la 5<sup>e</sup> extinction de masse ayant frappé notre planète (ici, une repousse de forêt au Permien).

# ÈRE





# Hiver d'impact : la terre plongée dans les ténèbres

Avec le K-Pg, une nouvelle époque géologique, le Paléocène, vient de naître dans un nuage de roches. Elle commence après un hiver très particulier. Est-il provoqué par les particules de soufre ? De carbone ? Les poussières ? Les spécialistes sont divisés. PAR MATHIAS CHAILLOT

**S**oudain, mais localisé, l'impact de Chicxulub n'est pas le principal tueur des dinosaures : c'est l'hiver d'impact qui a suivi. Celui-ci a fait disparaître 75 % des espèces de la planète. De récentes recherches permettent d'y voir plus clair sur la complexité du phénomène, pointant du doigt trois suspects principaux : la suie, le soufre et la poussière. Mais qui est le principal coupable ?

On sait aujourd'hui avec certitude que, à l'échelle géologique, cet hiver d'impact, parfois improprement dit "nucléaire", a été de très courte durée : après des températures



estimées entre 16°C et 29°C à la fin du Crétacé, la température moyenne calculée lors de récents travaux est de 25°C au tout début du Paléocène, preuve que l'événement a duré moins de 1000 ans. En 2014, l'effet de l'hiver d'impact sur les milieux marins est démontré par Johan Vellekoop (Université catholique de Louvain, Belgique) et ses collègues. Le paléoclimatologue spécialiste de la frontière K-Pg a fouillé dans les sédiments le long de la rivière Brazos, au Texas, où il a trouvé la matière organique nécessaire à l'utilisation d'un paléothermomètre basé sur les fossiles de thaumarchées, des micro-organismes dont

la membrane lipidique est sensible aux évolutions de températures. Conclusion : celles-ci auraient baissé en moyenne de 2°C lors des premières années qui suivent la collision, avec des chutes jusqu'à 7°C.

D'autres travaux se sont penchés sur l'effet du soufre. Le sol du Yucatán, où le géocroiseur s'est écrasé, est extrêmement riche en gypse, un minéral de sulfate hydraté. Dans l'atmosphère, les éléments sulfatés vaporisés se seraient transformés, par photolyse, en aérosols d'acide sulfurique, faisant baisser drastiquement les températures. Les estimations variables, de 30 Gt à 340 Gt (milliards de

Après l'impact, s'installe un obscurcissement du ciel provoquant l'effondrement de l'activité photosynthétique. Sans végétation, les herbivores meurent de faim, suivis des carnivores.



tonnes) de soufre éjectées, rendent difficiles les modélisations, mais 100 Gt (10 millions de fois le poids de la tour Eiffel) auraient pu faire chuter la température de surface de la planète de... 20°C selon certaines projections. À une condition : que les débris aient bien dépassé la couche la plus basse de l'atmosphère pour s'installer dans la stratosphère, où les courants d'altitude pouvaient les disséminer ensuite au-dessus de l'ensemble de la planète. Or, sur ce point, la rivière Brazos a fourni de nouveaux éléments. En 2022, l'équipe scientifique rassemblée autour du géochimiste Christopher K. Junium remarque la signature géochimique particulière des isotopes de soufre trouvés sur place : elle ne peut apparaître qu'en interaction avec les rayons ultraviolets de la stratosphère. La preuve que le soufre a bien été projeté à au

moins 12 km d'altitude ! *“Nous estimons que ces aérosols ont persisté pendant des décennies”*, détaille Christopher Junium. *“Trente ans constituant une estimation ‘prudente’ : L'une des clés de compréhension de l'hiver d'impact n'est pas seulement le degré de refroidissement, mais sa durée.”*

Responsable d'une baisse brutale des températures, le soufre affecte aussi directement la vie sur Terre. Les composés soufrés projetés dans la couche basse de l'atmosphère retombent en quelques semaines, causant de violentes pluies acides. *“L'un des aspects qui nous intéresse est aussi le flux, précise Christopher Junium. Les signatures isotopiques du soufre sont préservées dans les roches marines. Cela implique que le flux provenant de la terre ait été très élevé, même si nous ne pouvons encore donner de*

*“ L'une des clés de compréhension de l'hiver d'impact n'est pas seulement le degré de refroidissement, mais sa durée ”*





chiffre." Des données commencent toutefois à émerger : la modification du pH de la surface des océans aurait été de 0,2 à 0,3 unité, selon l'équipe internationale de chercheurs (issus des universités de Yale, Bristol et St. Andrews) qui a analysé la composition isotopique du bore de foraminifères, des eucaryotes unicellulaires à coquilles.

### STRANGELOVE OU LIVING OCEAN

Ces résultats sont venus s'intercaler entre deux hypothèses contradictoires, celle du "Strangelove Ocean" et celle du "Living Ocean". Baptisée en référence au film apocalyptique de Stanley Kubrick, *Dr. Strangelove (Docteur Folamour* dans sa version française), la première suppose une disparition quasi totale de la vie dans les océans et un arrêt du cycle du carbone pendant des centaines de milliers ou millions d'années. La seconde imagine une vie fragilisée en surface par l'acidification, mais maintenue dans les profondeurs, et reprenant rapidement dès la fin de l'hiver d'impact. Il semble que la réalité soit plus complexe. Les espèces qui ont le plus souffert sont les animaux à coquille, car l'acidification brutale empêche leur formation. Les populations de mollusques, coraux, foraminifères, coccolithophores ou phytoplanctons calcaires s'effondrent dans un premier temps :

la biodiversité des espèces calcifiantes aurait fondu de 60 % à 80 %, tandis que celle des autres espèces est réduite de 40 % à 60 %. Cette extinction sélective préserve les espèces côtières et les plus petits des planctons, capables de maintenir la calcification malgré l'acidité. Mais tout le reste de l'écosystème océanique est touché. À la base de la chaîne alimentaire, les phytoplanctons calcaires entraînent les autres espèces dans leur chute.

Une autre matière a pu participer à l'acidification des océans : le carbone. "*Les rejets de CO<sub>2</sub> dus à l'impact ont un effet encore plus fort sur l'acidification [que le soufre], estime Johan Vellekoop. Pour les organismes marins, c'est un autre facteur de stress, et c'est précisément cette combinaison de conditions néfastes qui a rendu l'impact si mortel.*" Une fois vaporisé ou pyrolysé, le carbone fossile a en partie rejoint la stratosphère. Bien plus occultant que le soufre, il a immédiatement contribué à l'obscurcissement du ciel.

### DES INCENDIES DURANT DES ANNÉES

Dans les semaines qui suivent l'impact, la Terre n'est pourtant pas plongée dans un noir total : une partie de la planète est en flammes. Les feux de forêt ont pu brûler pendant des semaines sur plusieurs continents. Certes, la suie qui s'en est dégagée n'a jamais dépassé les couches basses de l'atmosphère et son effet a probablement été de courte durée. Mais par la suite, le refroidissement de l'air en contact avec des océans relativement chauds ainsi que le changement de la composition atmosphérique alimentent tempêtes et ouragans. Les éclairs qui s'abattent sur les forêts mortes déclenchent alors de nouveaux incendies durant plusieurs années.

Et ce n'est pas fini ! Avec le soufre et le carbone, un troisième élément a pu jouer un rôle dévastateur : la poussière. Pour Philippe Claeys, géologue à l'Université Vrije de Bruxelles, ce n'est pas le froid, mais bien l'obscurité qui a tué les dinosaures. Car si le soufre a un effet important sur les températures, son impact est modéré sur l'activité photosynthétique, contrairement aux poussières de silicates, les minéraux qui forment 95 % de la croûte terrestre. "*Beaucoup de gens se sont focalisés sur le refroidissement et, dans*



Illustration d'Ajkateratops fuyant les feux de forêt.

ce cas, le soufre joue le rôle primordial, avec toute la planète sous les 0°C. Mais le modèle classique parle d'à peu près 320 Gt vaporisées, alors que d'après nos modèles, nous serions plutôt aux alentours de 80 Gt." Or, sur le site de Tanis (voir p. 52), Philippe Claeys observe que les particules de poussières sont majoritairement de l'ordre du micromètre, justement la taille qui leur permet de rester quatre fois plus longtemps en suspension que des particules plus grosses ou plus petites. Intégrées aux simulations, ces nouvelles données, publiées en octobre dernier dans *Nature Geoscience*, dressent un tableau très... sombre : les poussières obscurcissent le ciel en deux semaines sur la totalité de la planète, faisant chuter en deux mois les températures de 15°C en moyenne. Sur la Terre commence alors une longue nuit : l'activité photosynthétique est totalement à l'arrêt durant au moins deux ans. Passés ces vingt-quatre mois, l'obscurité vire à la pénombre avec, en guise de ciel, un plafond "noir comme au crépuscule d'un très sombre jour d'hiver", imagine Philippe Claeys. Seulement 10 % à 20 % de la lumière du soleil serait en mesure d'atteindre la surface de la Terre. "La baisse de l'activité photosynthétique a probablement été le déclencheur le plus important des extinctions, estime aussi Johan Vellekoop, qui a participé à l'étude. S'il n'y a ni plantes ni phytoplanctons, les herbivores périssent en quelques jours, semaines ou mois. La faim a été la principale cause de mortalité."

Les pluies acides provoquées par le soufre projeté dans l'atmosphère réduisent la population des petits animaux à coquille et, par contre-coup, la plupart des animaux marins.



L'agonie commence. Les plus gros herbivores, qui ont besoin d'importantes quantités de végétaux, périssent en quelques semaines, et tous les dinosaures phytophages en quelques mois. Les carnivores suivent : les plus gros, comme les T-Rex, partent en premier, après s'être probablement nourris de carcasses dans un premier temps. Au bout de six mois, tous les gros dinosaures carnivores ont disparu, alors que les plus petits survivent encore en se nourrissant d'insectes. "C'est



Plus mobiles et économes en énergie, certains petits mammifères ont survécu à la catastrophe.

En une saison, l'absence de lumière a fait disparaître le phytoplancton et, par ricochet, le zooplancton qui s'en nourrissait. Ici, une micrographie lumineuse de dinoflagellés.

“ C'est une question de mois, voire d'années avant que tous les dinosaures ne soient éteints, mais pas de décennies ”

*une question de mois, voire d'années avant que tous les dinosaures ne soient éteints, mais certainement pas de décennies”, tranche Johan Vellekoop.*

#### RETOUR DE LA LUMIÈRE

Deux à trois ans après l'impact, le soleil perce doucement à travers une atmosphère chargée de particules. La vie reprend grâce aux graines qui se remettent à éclore. En mer, des groupes majeurs de phytoplanctons n'ont pas cette chance : au-delà d'une saison sans lumière, ils ont disparu. D'autres, comme les dinoflagellés, se sont maintenus en entrant en phase dormante. “Même si plusieurs groupes de phytoplanctons ont survécu, leur absence

temporaire ou locale a entraîné l'extinction de nombreux groupes de zooplanctons. L'écosystème s'est effondré et de nombreux herbivores et carnivores ont disparu”, ajoute Johan Vellekoop.

Aujourd'hui encore, modélisations et résultats continuent de se contredire. Toutefois la plupart des experts s'accordent à dire que la chute des températures a été d'au moins 10°C pendant les deux premières années, jusqu'à 25°C pour les estimations les plus élevées, avant de remonter doucement. Cinq ans après l'impact, le ciel a quasiment retrouvé ses couleurs d'autrefois, même s'il reste “inhabituellement épais et nuageux”. La pluie a déposé au sol la majeure partie de la poussière, du soufre et de la suie. Les fougères repoussent et quelques espèces, comme les petits mammifères capables d'hiberner, sont sorties à la recherche d'insectes. Aucun dinosaure non-avian n'a survécu. Si l'écosystème est loin d'être rétabli, la lumière et la température reviennent à leurs niveaux préimpact en vingt ou trente ans. “Alors le ciel redevient relativement normal, raconte Johan Vellekoop. Les premiers arbres réapparaissent et, avec l'extinction d'une grande partie des herbivores, la végétation redevient luxuriante.” Le règne des mammifères peut commencer. ■

# LES VOLCANS DU DECCAN, L'AUTRE COUPABLE IDÉAL

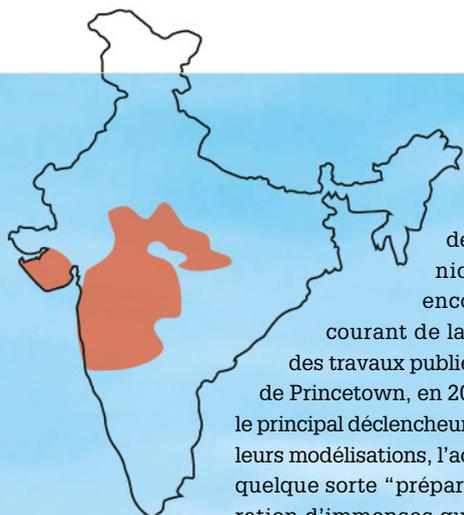
On les a longtemps tenus pour responsables de la 5<sup>e</sup> extinction de masse avant qu'ils ne soient détrônés par l'astéroïde. Mais une question reste en suspens : qui a frappé le premier?

PAR MATHIAS CHAILLOT

**J**usqu'à la découverte du site de Chicxulub, l'activité des volcans du Deccan était considérée comme le seul événement connu réunissant toutes les conditions ayant pu entraîner la 5<sup>e</sup> extinction de masse. Les trapps (empilement de coulées de lave formant des reliefs) qui forment le paysage de cette immense région sont le vestige d'une intense activité volcanique qui a agité ce qui est aujourd'hui l'Inde pendant un million d'années. Entrant en activité 400 000 ans avant l'impact de Chicxulub et se prolongeant pendant encore 600 000 ans, les volcans du

Deccan ont dispersé de 2 à 3 millions de km<sup>3</sup> de lave sur près de 2 millions de km<sup>2</sup>, les couches de magma solidifié s'élevant par endroits sur plus de 2 km. Si un consensus scientifique est désormais établi sur le rôle central de l'astéroïde dans





Les Ghats occidentaux ou chaîne de montagnes Sahyadri bordent le plateau basaltique du Deccan, à l'ouest de l'Inde.

l'extinction des dinosaures non-aviens, l'importance de cette activité volcanique hors norme fait encore débat. À contre-courant de la pensée dominante, des travaux publiés par des chercheurs de Princetown, en 2022, y voient toujours le principal déclencheur de l'extinction. Selon leurs modélisations, l'activité du Deccan a en quelque sorte "préparé le terrain" : la libération d'immenses quantités de gaz dans l'atmosphère pendant des centaines de milliers d'années aurait pu être responsable du réchauffement climatique (par l'accumulation de gaz carbonique) repéré durant les 500 000 dernières années de la fin du Crétacé, mais aussi du très bref refroidissement (à cause des particules de soufre) dans la toute dernière partie de cette ère, quelques dizaines de milliers d'années avant l'extinction. Ces variations climatiques auraient stressé la faune et la flore et dérégulé le cycle du carbone.

### ÉNERGIE SISMIQUE DE L'IMPACT

Depuis 2015, une autre théorie a vu le jour, portée notamment par deux chercheurs de l'université de Berkeley (Californie), Mark Richards et Walter Alvarez (par ailleurs l'un des premiers à avoir analysé le lien entre l'impact de la météorite et la disparition des dinosaures) : si l'activité volcanique a commencé

bien avant l'impact, ce dernier l'aurait relancée. Car, selon d'autres méthodes de datation, publiées en 2023 dans *Science*, les principales vagues d'éruption auraient débuté dans les 50 000 premières années du Paléocène (après la fin du Crétacé), ce qui laisse supposer que ce regain d'activité a été déclenché par l'énergie sismique produite par l'impact – les 50 000 ans entrant dans la marge d'erreur à cette échelle de temps géologique.

Une datation plus précise des différentes phases du Deccan devrait pouvoir confirmer l'une ou l'autre de ces hypothèses. Pour autant, elles ne sont pas nécessairement contradictoires. Les volcans auraient pu agir de façon bien plus discrète en amont. Dans ce dernier scénario, les chambres magmatiques souterraines se seraient progressivement libérées de leurs gaz (principalement le CO<sub>2</sub>) durant les premières centaines de milliers d'années, soit la phase la plus minime des éruptions, mais qui correspond à un réchauffement planétaire parfois évalué jusqu'à +8°C. Les deux activités, dégazage passif et activité éruptive, n'étant pas corrélées, les volcans du Deccan se seraient donc réveillés sous l'impulsion du tremblement de Terre provoqué par l'astéroïde, mais après avoir déjà vidé une grande partie de leurs stocks de gaz à effet de serre. Les dernières tonnes de CO<sub>2</sub> projetées à la fin de leur activité auraient même pu participer au réchauffement suivant l'hiver d'impact. Et voilà le Deccan qui passerait de coupable idéal à sauveur improbable ! ■





# Pourquoi les mammifères ont-ils survécu ?

Nos lointains ancêtres sont loin d'avoir traversé l'apocalypse sans dommage. 90 % des espèces de mammifères ont disparu après l'impact ! Seuls les plus petits ont subsisté... PAR CORALIE HANCOCK

**A**u lendemain de la chute de l'astéroïde, la Terre n'est plus que cendres, boue et désolation. Les cadavres jonchent le sol. Le silence, assourdissant, n'est perturbé que par le bruit du vent et celui des rivières dont le courant est entravé par de multiples débris. Quand, soudain, un trottement se fait entendre. D'un terrier vient d'émerger un petit animal aux yeux globuleux et au museau pointu. Son corps couvert de poils ne laisse aucun doute sur son appartenance : il s'agit d'un mammifère. Surprenant ? Pas tout à fait. Car si le Mésozoïque, qui vient de s'achever brutalement, est considéré comme l' "Ère des reptiles", dinosaures et mammifères ont en réalité cohabité pendant plus de 150 millions d'années (Ma). Ils sont en effet apparus à peu près en même temps, il y a environ 225 Ma.

Ces vingt dernières années, les découvertes de nouveaux fossiles, notamment en Chine, ont montré que si les mammifères sont restés de petite taille durant toute cette cohabitation, ils étaient bien plus diversifiés qu'on ne le croyait auparavant. "Il y avait des mammifères

*fouisseurs semblables à des taupes, d'autres adaptés à la vie semi-aquatique, un peu comme des castors ; d'autres encore étaient arboricoles, et l'on a même retrouvé des mammifères capables de planer comme le font aujourd'hui les écureuils volants",* détaille Emmanuel Gheerbrant, paléontologue au Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Cependant, ajoute-t-il, "ils occupaient des niches variées, mais refuges, dans le sens où elles les mettaient relativement à l'abri des dinosaures. Ce n'est qu'à la disparition de ces derniers que les mammifères ont pris les places laissées vacantes. Ils ont gagné en taille et en diversité. Ils ont finalement conquis la quasi-totalité des écosystèmes". Sauf que... l'histoire aurait pu mal se terminer pour eux aussi. "Dire que les dinosaures ont disparu alors que les mammifères ont survécu est exact, mais simplificateur. Car, en réalité, les mammifères ont failli disparaître eux aussi !", assène Steve Brusatte, paléontologue à l'université d'Édimbourg (Écosse) et auteur du livre *Le Triomphe et le règne des mammifères*, dont la traduction française est parue au mois d'octobre. "En se basant sur les



relevés fossilifères datant de juste avant et de juste après l'impact de l'astéroïde, on estime que 90 % des mammifères, peut-être même plus, ont disparu !", précise-t-il. La question n'est donc pas de comprendre comment les mammifères ont globalement traversé la catastrophe, mais plutôt comment quelques rares espèces y ont survécu.

"La taille semble avoir été un facteur déterminant. Les rescapés sont tous des mammifères de très petite taille, comme des musaraignes ou des souris", indique Lucas Weaver, paléontologue à l'université du Michigan, aux États-Unis. "Les animaux de taille modeste ont souvent un cycle de reproduction plus court, un taux

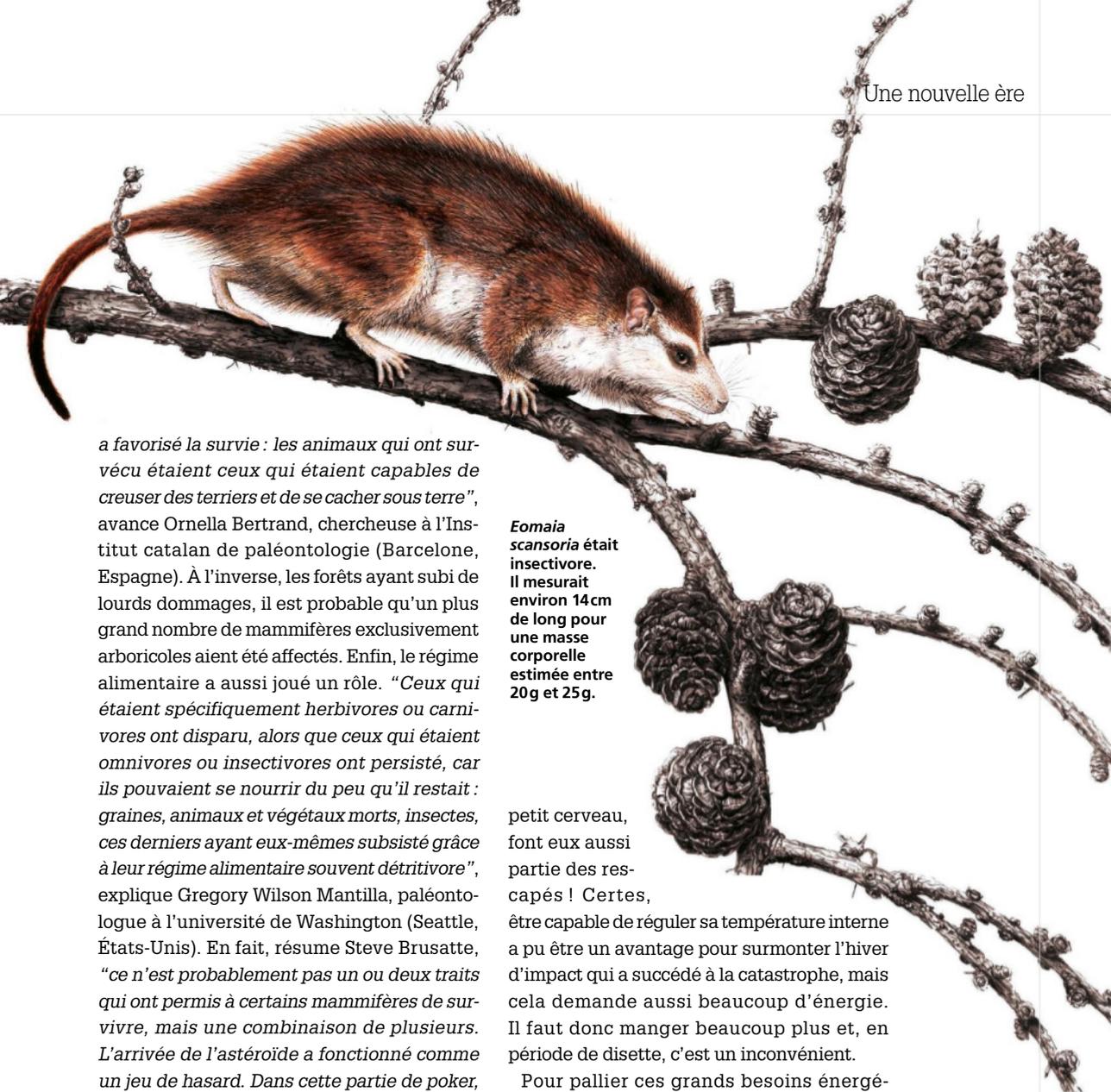
Les restes fossilisés du plus vieil exemplaire de mammifère placentaire, *Eomaia scansoria*, datant de 125 Ma, ont été retrouvés figés dans du schiste, en 2002.

élevé de renouvellement des générations et des populations plus importantes. C'est un avantage pour surmonter une extinction de masse", explique Emmanuel Gheerbrant. Et une petite taille permet aussi de se cacher plus facilement.

### UN JEU DE HASARD

Selon les paléontologues, un autre facteur a joué un rôle essentiel. "Au Paléocène, on trouve des mammifères assez bizarres avec un corps très trapu. Cela pourrait être une adaptation à un mode de vie fouisseur, lequel

“ *Ceux qui étaient omnivores ont survécu, car ils pouvaient se nourrir du peu qu'il restait : graines, animaux et végétaux morts, insectes...* ”



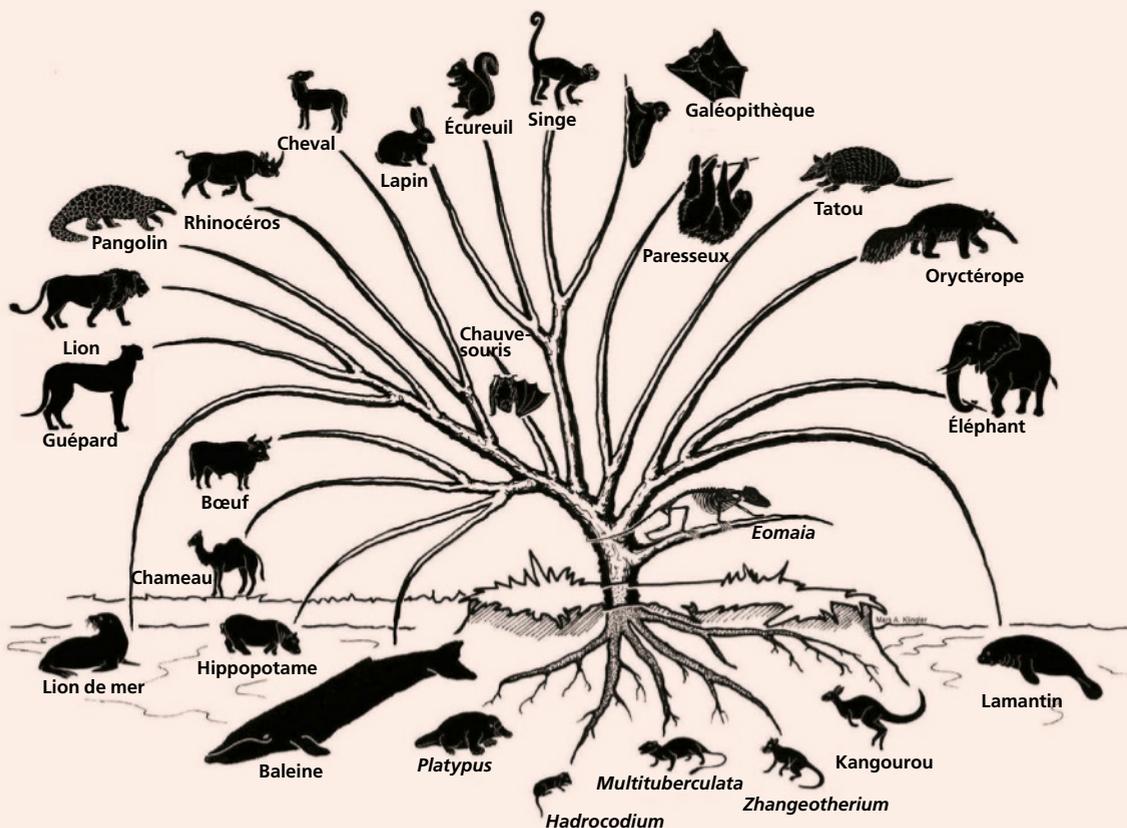
a favorisé la survie : les animaux qui ont survécu étaient ceux qui étaient capables de creuser des terriers et de se cacher sous terre”, avance Ornella Bertrand, chercheuse à l’Institut catalan de paléontologie (Barcelone, Espagne). À l’inverse, les forêts ayant subi de lourds dommages, il est probable qu’un plus grand nombre de mammifères exclusivement arboricoles aient été affectés. Enfin, le régime alimentaire a aussi joué un rôle. “Ceux qui étaient spécifiquement herbivores ou carnivores ont disparu, alors que ceux qui étaient omnivores ou insectivores ont persisté, car ils pouvaient se nourrir du peu qu’il restait : graines, animaux et végétaux morts, insectes, ces derniers ayant eux-mêmes subsisté grâce à leur régime alimentaire souvent détritivore”, explique Gregory Wilson Mantilla, paléontologue à l’université de Washington (Seattle, États-Unis). En fait, résume Steve Brusatte, “ce n’est probablement pas un ou deux traits qui ont permis à certains mammifères de survivre, mais une combinaison de plusieurs. L’arrivée de l’astéroïde a fonctionné comme un jeu de hasard. Dans cette partie de poker, les dinosaures avaient une main particulièrement mauvaise : ils étaient gros, ne pouvaient pas se cacher, mettaient du temps à devenir adulte, devaient manger une quantité importante de nourriture et avaient un régime alimentaire très spécialisé. À l’inverse, certains mammifères ont eu une bonne main”.

On a longtemps considéré que ce jeu gagnant s’appuyait sur trois cartes maîtresses : l’endothermie des mammifères, leur dentition perfectionnée et la taille de leur cerveau. Cette théorie est, aujourd’hui, largement remise en cause. Par exemple, les crocodiles, qui ont un métabolisme “à sang froid”, qui avalent leurs proies tout rond et qui ont un

***Eomaia scansoria*** était insectivore. Il mesurait environ 14 cm de long pour une masse corporelle estimée entre 20g et 25g.

petit cerveau, font eux aussi partie des rescapés ! Certes, être capable de réguler sa température interne a pu être un avantage pour surmonter l’hiver d’impact qui a succédé à la catastrophe, mais cela demande aussi beaucoup d’énergie. Il faut donc manger beaucoup plus et, en période de disette, c’est un inconvénient.

Pour pallier ces grands besoins énergétiques, les mammifères ont développé une dentition perfectionnée. En particulier, les thériens (marsupiaux et placentaires) possèdent une molaire dite “tribosphénique”, c’est-à-dire à trois bosses (ou cuspidés). “Avec cette dent multi-usage qui permet non seulement de percer, de couper, mais aussi de broyer les aliments, est apparue une mastication caractérisée par des mouvements verticaux et latéraux, explique Emmanuel Gheerbrant. Celle-ci permet de tirer un meilleur profit de la nourriture.” Mais pour Lucas Weaver, “la mastication ne semble pas avoir joué un rôle dans la survie : les thériens mâchent, mais les multituberculés [une autre



lignée de mammifères, NDLR] se contentent de frotter leurs dents d'avant en arrière. Or, ce groupe de mammifères a également survécu à la crise Crétacé-Paléogène avant de disparaître il y a 35 Ma". Emmanuel Gheerbrant assure cependant que "la dentition et le type de mastication associés ont joué un rôle clé dans la phase de récupération post-crise, lorsque les mammifères se sont diversifiés et adaptés à des régimes alimentaires variés".

### UN NÉOCORTEX TRÈS PETIT

Quant au cerveau, souligne Ornella Bertrand, "les mammifères du Crétacé supérieur avaient probablement un néocortex très petit, et ce n'est donc pas grâce à des capacités cognitives élevées qu'ils ont survécu". L'année dernière, la chercheuse a publié des travaux montrant que dans les premiers millions d'années qui ont suivi la chute de l'astéroïde, les mammifères ont très rapidement augmenté leur masse corporelle,

mais pas la masse de leur cerveau. Autrement dit, le rapport entre taille du cerveau et taille du corps a diminué dans un premier temps ! "Alors que toutes les niches écologiques avaient été libérées et qu'il n'y avait pas de compétition pour les occuper, un gros cerveau n'était pas nécessaire. Cela aurait même été un inconvénient, car il demande beaucoup d'énergie, explique Ornella Bertrand. Cette caractéristique des mammifères modernes n'est apparue que plusieurs millions d'années plus tard, lorsque la compétition

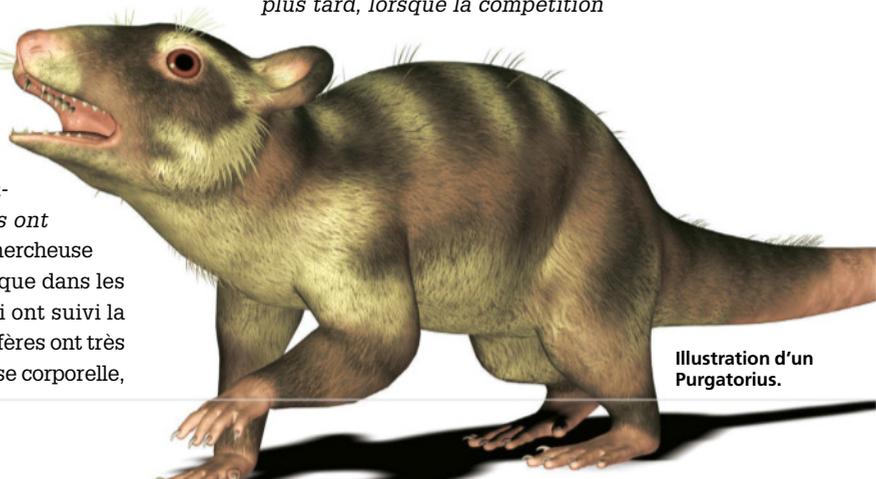


Illustration d'un Purgatorius.

## ***Eomaia*, à l'origine des mammifères placentaires**

En 2002, une équipe de chercheurs du Carnegie Museum of Natural History, en Pennsylvanie, et de l'Académie chinoise des sciences géologiques découvre, dans le nord-est de la Chine, un squelette de mammifère euthérien, autrement dit placentaire. Ce fossile se trouvait dans la formation Yixian, connue pour ses fossiles datant du Crétacé inférieur. Ce petit mammifère, nommé *Eomaia scansoria*, est daté d'environ 125 Ma, "ce qui repousse, écrivent les chercheurs dans l'article qui relate la découverte\*, d'environ 40 à 50 Ma la date des plus anciens documents sur les euthériens." Cette découverte rebat les cartes de l'évolution et place ce petit spécimen à la racine de l'arbre phylogénétique des mammifères placentaires. "Le nouvel euthérien possède des membres et des pieds qui ne sont connus que des mammifères scansoriaux (grimpant) et arboricoles (vivant dans les arbres) existants, contrairement aux caractéristiques terrestres ou cursoriales (courant) des autres euthériens du Crétacé. Cela suggère que les premières lignées d'euthériens ont développé des adaptations locomotrices différentes, ce qui a facilité leur propagation dans diverses niches au Crétacé", écrivent les chercheurs.

\*The Earliest Known Eutherian Mammal, Qiang Ji et al., 25 avril 2002.

entre mammifères est devenue importante." Reste une question : si l'astéroïde a bel et bien rebattu les cartes de l'évolution et créé une sorte de goulet d'étranglement au travers duquel seuls quelques mammifères sont passés... qui sont les rescapés de cette apocalypse ? Sommes-nous les descendants d'une seule lignée survivante qui se serait diversifiée par la suite pour donner naissance aux trois groupes actuels de mammifères (monotrèmes, marsupiaux et placentaires) ? En l'absence de fossiles de mammifères placentaires

“ On peut envisager que *Purgatorius*, un groupe souche des primates, existât déjà à la fin du Crétacé ”

au Mésozoïque, on a longtemps cru que c'était le cas. Mais en 2002, la découverte du fossile d'*Eomaia* (voir ci-contre) change la donne : bien qu'il soit vieux de 125 Ma, sa dentition et la morphologie de son bassin plaident en faveur d'un mode de reproduction placentaire, même si le temps de gestation était probablement très court.

Cette hypothèse concorde avec les analyses des généticiens. Grâce à la technique de l'horloge moléculaire, qui mesure le temps s'écoulant entre deux mutations, il est possible de calculer à quel moment les espèces ont divergé les unes des autres à partir d'un ancêtre commun. En 2007, l'équipe d'Olaf Bininda-Emonds (université de Munich, Allemagne) a ainsi établi que les monotrèmes – mammifères qui pondent des œufs et dont les seuls représentants actuels sont l'ornithorynque et l'échidné –, ont divergé des thériens il y a 166,2 Ma. Les marsupiaux et les placentaires se seraient quant à eux séparés il y a 147,7 Ma. En 2021, une autre étude a même fait remonter la divergence des monotrèmes à 187 Ma. À la fin du Crétacé, ces trois groupes étaient déjà bien séparés les uns des autres et ce sont donc des représentants de chacun de ces groupes qui ont franchi la limite Crétacé-Paléogène. Cependant, précise Emmanuel Gheerbrant, "les marsupiaux ont été beaucoup plus affectés que les placentaires". Il s'en est donc fallu de peu pour que les ancêtres des kangourous et des koalas disparaissent. Du côté des placentaires, en revanche, une étude publiée cet été par l'équipe d'Emily Carlisle (université de Bristol, Angleterre) soutient qu'au moment de l'impact de l'astéroïde, au moins sept groupes différents avaient émergé. Et parmi ces groupes... les primates ! "Les plus anciens restes de *Purgatorius*, un groupe souche des primates, datent seulement de 105 000 à 139 000 ans après l'impact de l'astéroïde. Sur l'échelle de l'évolution, c'est très peu et l'on peut envisager que *Purgatorius* existât déjà à la fin du Crétacé", avance Ornella Bertrand. Et si son apparence est plus proche de celle d'une souris que d'un singe, il est possible que ce "protosinge", notre lointain ancêtre, ait vu tomber l'astéroïde... et lui ait survécu. ■

# Plantes à fleurs Chicxulub, connais pas !

Seraient-elles  
les grandes gagnantes  
de la catastrophe ?  
Des chercheurs qui ont  
analysé des phylogénies  
d'angiospermes n'ont  
trouvé aucune trace  
d'une extinction massive.

PAR ARMELLE CAMELIN

**B**orja Cascales-Miñana, chercheur paléobotaniste au CNRS/ université de Lille, unité évolution écologie et paléontologie, est catégorique : l'extinction de masse du Crétacé-Paléogène (K-Pg) ne concerne pas les plantes. "Ce n'est pas une apocalypse planétaire, dit-il. Quand on regarde les niveaux de diversité des plantes et notamment des plantes à fleurs, les angiospermes, avant et après la limite K-Pg, on n'observe aucune interruption, mais une croissance continue." D'après son étude intitulée *Plants, the Great Survivors* publiée en 2018 dans *Geology Today*, les événements qui ont bouleversé la Terre il y a 66 millions d'années (Ma) n'ont eu, à long terme, aucun impact sur les plantes – ils ont peut-être même accéléré leur développement.

Micrographie d'une coupe transversale de stomates – ici de muguet (*Convallaria majalis*) – permettant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère. Ces cellules, essentielles à la vie, sont apparues il y a 408 Ma.



Au cours du Crétacé supérieur, avant la limite K-Pg, un changement majeur dans l'histoire de la végétation du globe a lieu. Nous passons d'un monde végétal dominé par les gymnospermes (qui comprennent les conifères, les cycadales, le ginkgo...) à un monde où règnent les angiospermes. Ce sont deux groupes de plantes à graines, mais l'ovule des gymnospermes a la particularité d'être à nu, contrairement à celui des angiospermes qui est enveloppé par un ovaire.

Les angiospermes portent des fleurs, puis des fruits. Ces végétaux font leur apparition il y a plus de 100 Ma et occupent rapidement toutes les niches écologiques. À la fin du Crétacé, les angiospermes constituent déjà le groupe végétal dominant le plus diversifié.

### DYNAMIQUE DIFFÉRENTE

Dans une autre étude menée par Jamie Thompson de l'université de Bath (Royaume-Uni) pour *The Royal Society*, les conclusions sont les mêmes : les plantes ont souffert de la crise à court terme, mais pas à long terme. *“Les archives fossiles suggèrent que l'événement K-Pg a eu un fort impact régional sur les angiospermes, avec jusqu'à 75 % d'extinction d'espèces, mais il n'a eu qu'un impact mineur sur les taux d'extinction des principales lignées (familles et ordres). En analysant deux mégaphylogénies d'angiospermes contenant environ 32 000 et 73 000 espèces existantes, nous montrons ici des taux d'extinction relativement constants tout au long des temps géologiques et aucune preuve d'extinction massive à la limite K-Pg.”*

Thomas Servais, coauteur de l'étude de Borja Cascales-Miñana et paléopalynologue chercheur du CNRS spécialisé dans l'étude du microphytoplancton, rappelle les événements : *“Après l'impact de la météorite, sous le nuage de cendre et de poussière et à cause du refroidissement global, les plantes ont probablement toutes péri ; mais une fois que cette crise – qui a duré quelques années – était terminée, les plantes sont reparties. Elles ont une dynamique tout à fait différente de celle des autres êtres vivants.”*

Le célèbre palynologue américain Alfred Traverse, spécialiste des spores et pollens, l'écrivait déjà en 1988 : *“Elles dansent*

# À la fin du Crétacé, les angiospermes constituent déjà le groupe végétal dominant le plus diversifié

sur un rythme différent.” “Si vous allez dans un jardin zoologique et que vous tuez tous les animaux avec une mitraillette, il y a une extinction, décrit Thomas Servais. En revanche, si vous allez dans un jardin botanique et que vous brûlez toutes les plantes, il n’y a aucune extinction : un, deux ou trois ans plus tard, tout aura repoussé. C’est exactement ce qui s’est passé à la limite K-Pg.” Les seules plantes à graines qui ne semblent pas avoir survécu étaient déjà devenues très rares bien avant l’événement K-Pg, lequel ne semble pas être la cause de leur disparition, précisent les chercheurs.

Alors comment les plantes font-elles pour survivre aux catastrophes écologiques ? “C’est probablement dû à leur stratégie de dispersion, écrivent Borja Cascales-Miñana et Thomas Servais dans leur étude. Elles impliquent des spores, des graines et des structures souterraines telles que des cormes [un organe de réserve ayant l’aspect d’un bulbe, mais formé d’une tige renflée entourée d’écaillés, NDLR], des rhizomes [tige remplie de réserve alimentaire, NDLR] et des tubercules qui peuvent rester dormants dans ou sur le sol pendant un temps considérable avant de germer ou de repousser.”

## FACTEURS GÉNÉTIQUES INTRINSÈQUES

Dans ses recherches sur le Crétacé, Bernard Gomez, chercheur au CNRS du laboratoire de géologie de Lyon, retrouve d’ailleurs énormément de graines de tailles millimétriques. “Il ne reste plus rien à l’intérieur, uniquement cette couche externe extrêmement résistante. Elle est composée de molécules mises en place par les plantes pour permettre aux cellules de résister aux éléments extérieurs.” L’autre

particularité qui aurait permis aux plantes de survivre est leur patrimoine génétique. “L’initiation de nouvelles formes végétales résulte probablement principalement de facteurs génétiques intrinsèques”, décrit Alfred Traverse dans son étude de 1988. “Les taxons végétaux sont beaucoup moins sujets à des facteurs extrinsèques que les groupes animaux comparables. Les plantes évoluent sous des formes apparentées adaptées à des environnements très différents.” Certaines plantes à fleurs sont polyploïdes : cela signifie qu’elles produisent plus de deux lots de chromosomes et ont donc un patrimoine génétique plus varié. “Chez les plantes, deux gamètes s’associent pour faire un zygote, un œuf fécondé, décrit Bernard Gomez. La polyploïdie, c’est le fait



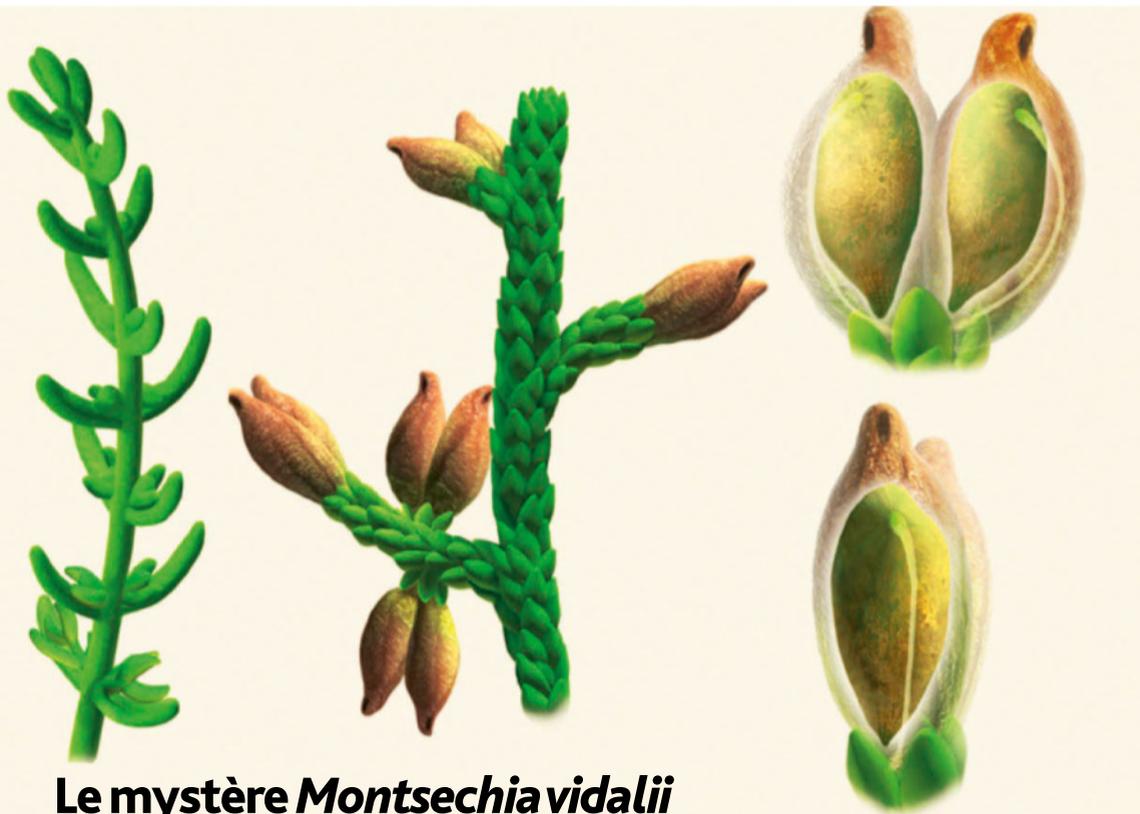
qu'au moment des divisions cellulaires ultérieures, les cellules restent porteuses d'au moins deux exemplaires de chromosomes. Il faut voir le génome comme un éventail de possibilités : plus les possibilités sont conservées, plus l'organisme sera capable de s'adapter à des changements environnementaux."

### CAPACITÉ DE SURVIVANCE

La polyploidie est considérée comme un facteur majeur de la plasticité phénotypique des plantes qui peuvent, selon les conditions environnementales auxquelles elles sont exposées, produire des phénotypes différents. "Les plantes ont une capacité de survivance incroyable. On trouve des plantes dans les milieux les plus hostiles de la Terre. Après

une coulée de lave, les premiers organismes qui apparaîtront sont des mousses et des lichens", souligne Borja Cascales-Miñana. De là à penser que, finalement, l'extinction du Crétacé-Paléogène a joué un rôle positif sur les plantes à fleurs, il n'y a qu'un pas.

"En tout cas, ce qui est certain, estime Borja Cascales-Miñana, c'est que l'extinction des dinosaures n'a eu aucun impact sur le remplacement de la flore déjà en cours. Nous sommes passés d'une flore dominée, au Mésozoïque, par les gymnospermes, à une flore dominée par les angiospermes. La capacité de colonisation des plantes à fleurs est largement supérieure : même sans météorite, elles auraient remplacé les gymnospermes, plus primitives." ■



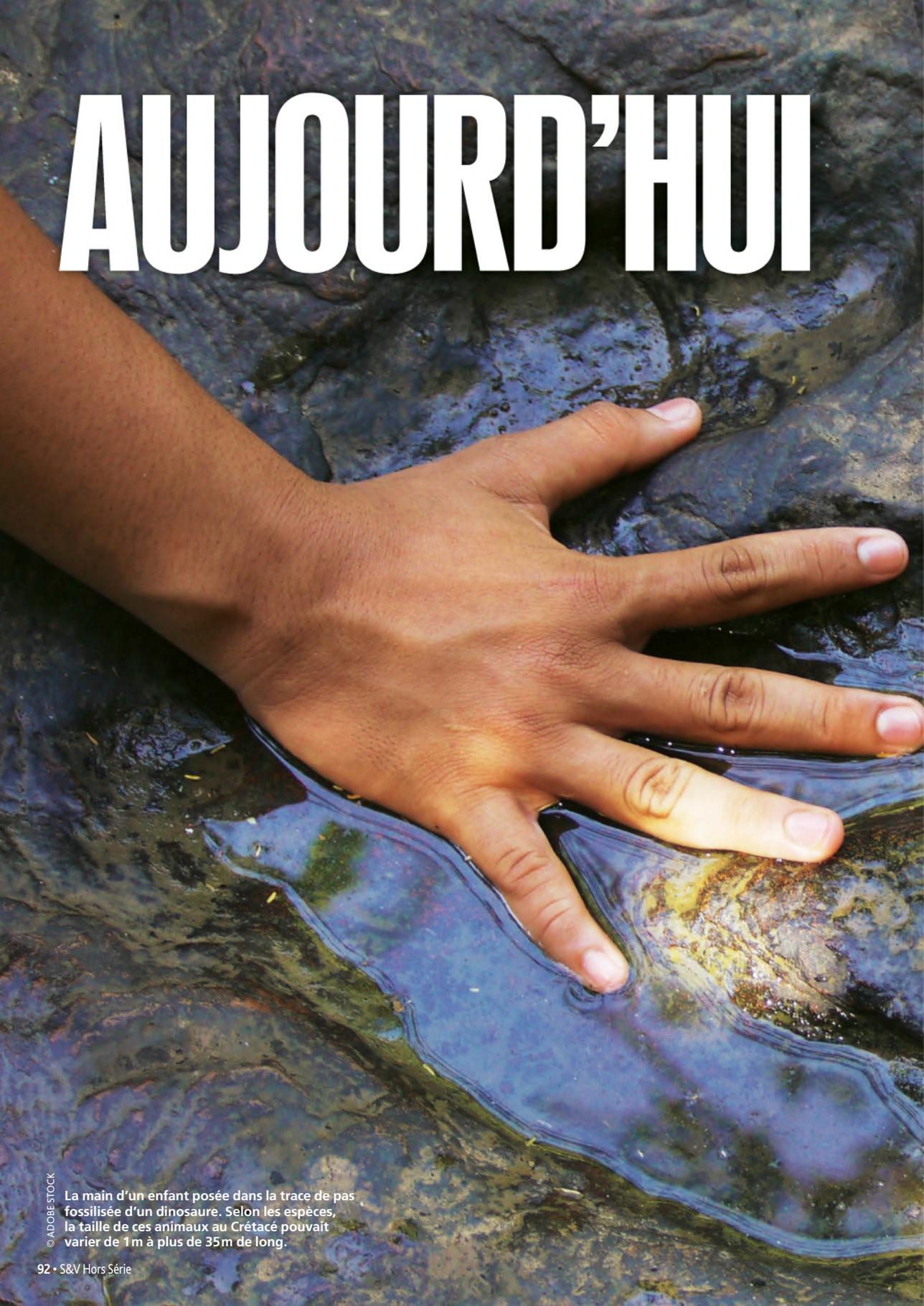
## Le mystère *Montsechia vidalii*

Découvert au début du xx<sup>e</sup> siècle sur le site de Las Hoyas, en Espagne, *Montsechia vidalii* aurait vécu il y a 130 Ma. Mais il aura fallu attendre 2015 pour qu'une équipe dirigée par le paléobotaniste Bernard

Gomez perce son mystère : il s'agit d'une angiosperme aquatique. Les chercheurs la décrivent avec "très peu d'appareils stomatiques, une cuticule extrêmement fine, des tiges étroites et démesurément longues donnant

une allure de grande flexibilité, des fruits sans pistil localisés sur toute la plante". Elle est la plus ancienne plante à fleurs connue après *Nanjinganthus dendrostyla*, découverte en 2018 et datée de 174 Ma.

# AUJOURD'HUI

A close-up photograph of a child's hand with a light skin tone resting on a dark, wet rock surface. The hand is positioned over a fossilized footprint, which is a clear impression of a dinosaur's foot. The rock is dark and glistening with water, and the fossil is a lighter, yellowish-brown color. The background is a blurred, textured rock surface.

La main d'un enfant posée dans la trace de pas fossilisée d'un dinosaure. Selon les espèces, la taille de ces animaux au Crétacé pouvait varier de 1 m à plus de 35 m de long.

© ADOBE STOCK

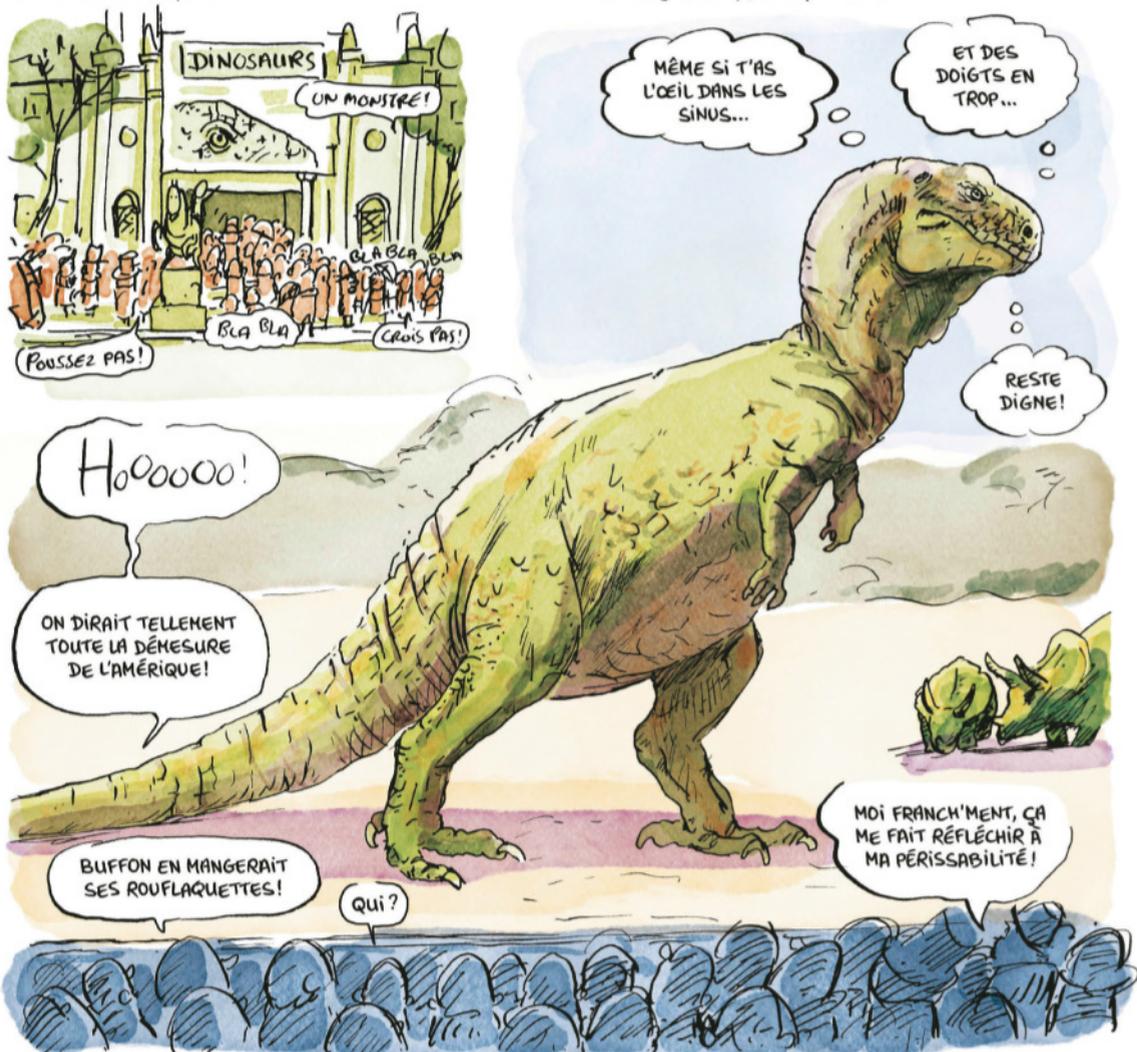


# “Les dinosaures font écho à l’humain”

Et une fois de plus...



... Knight Frappa super fort.



Les premières représentations les montraient plus pathétiques que sanguinaires... Aujourd'hui, ils fascinent. Sont-ils le reflet de notre condition humaine? Nous avons posé la question à Marion Montaigne, auteure de *Nos mondes perdus\**, et à Pascal Hachet, psychologue, auteur de *Dinosaures sur le divan\*\**. PAR AMANDA SCHREFF



**SVHS: Êtes-vous d'accord quand on dit que les dinosaures fascinent?**  
**Marion Montaigne:**

À une époque, ils ne fascinaient pas ! Ce qui fascine est l'image que l'on a donnée des dinosaures à travers les films. *Jurassic Park* a choisi de les montrer très athlétiques.

On voit toutes les veines, tous les muscles... Ils sont bodybuildés ! Si l'on prend l'image que l'on en avait au début du XVIII<sup>e</sup> ou du XIX<sup>e</sup> siècle, on n'aurait pas fait un film passionnant. Aujourd'hui, des paléontologistes essaient de les représenter plus apaisés : des tyrannosaures sont dessinés en train de faire la sieste, les sauropodes vivent en troupeau comme des vaches...

**Pascal Hachet:** Oui. *Jurassic Park* a introduit une rupture assez radicale, mais très positive, par rapport à la manière dont, culturellement, les dinosaures étaient considérés. Avant, ils apparaissaient dans les romans que l'on appelait les "mondes perdus" : des

explorateurs trouvaient un endroit où le temps s'était arrêté, une espèce d'îlot de préhistoire où l'on pouvait entrer en contact avec des dinosaures.

**SVHS: Pourquoi cet intérêt pour les mondes perdus?**

**P.H.:** Il y a, au XIX<sup>e</sup> siècle, une remise en question de la création du monde telle qu'elle était bibliquement enseignée. Parallèlement, on

a connu l'essor des villes, des lieux d'effervescence prodigieux sur le plan intellectuel, culturel, social. Il y a eu deux mouvements parallèles : l'essor du monde industriel où l'homme a commencé à façonner la nature, et le développement d'immenses chantiers de fouilles qui ont mis au jour des cités perdues, comme Troie [dont les ruines ont été mises au jour à partir de 1871 par l'explorateur



À gauche, planche tirée de la BD de Marion Montaigne. À droite, l'affiche du film *Le Monde perdu*, 1960.

et archéologue Heinrich Schliemann, NDLR]. Le début du xx<sup>e</sup> siècle voit aussi l'avènement de la psychanalyse. Tout cela a aidé à creuser une certaine intériorité de réflexion sur le passé.

**SVHS :** *Pourquoi dites-vous qu'il y a eu un avant et un après Jurassic Park ? On regarde désormais les dinosaures autrement ?*

**P.H. :** La nouveauté dans *Jurassic Park* est qu'ils ont été créés par l'homme, à notre époque, dans une optique de spectacle et non scientifique. Dans les films en noir et blanc du début du xx<sup>e</sup> siècle, on trouvait déjà des dinosaures qui attaquaient des villes. Idem au Japon, dans les années 1980, avec la série des *Godzilla*. Mais dans le film de Spielberg, ces animaux n'ont rien demandé et ils sont là dans un monde qui leur inflige une violence extraordinaire.

**M.M. :** Clairement, oui ! J'ai demandé au paléontologue Ronan Allain de regarder

*Jurassic World : le monde d'après* [sorti en 2022, NDLR] en m'attendant à ce qu'il critique le film. En fait, il a beaucoup de sympathie pour ces histoires qui lui ont donné envie d'exercer son métier. Il sait que l'image est romancée, mais les films mettent sur le devant de la scène un univers particulier, ils allument une étincelle. Quand on dit "dinosaures" aux gens, la plupart répondent T-Rex, vélociraptor...

**SVHS :** *Mais, finalement, on voit toujours les mêmes...*

**M.M. :** Oui. Ce film offre une image des dinosaures très américanocentrée. Alors qu'en Allemagne, on peut voir le giraffatitan [*brachiosaure provenant d'Afrique et exposé à Berlin*, NDLR]. En Chine, on trouve de magnifiques spécimens avec des plumes. Un paléontologue m'expliquait qu'il y avait sans doute plein de fossiles en Amazonie, mais aller creuser dans ces zones aux racines denses et profondes

est très compliqué... On rate plein de choses !

**SVHS :** *Dans les films, les dinosaures sont violents et sanguinaires. Qu'est-ce que ça raconte sur nous ?*

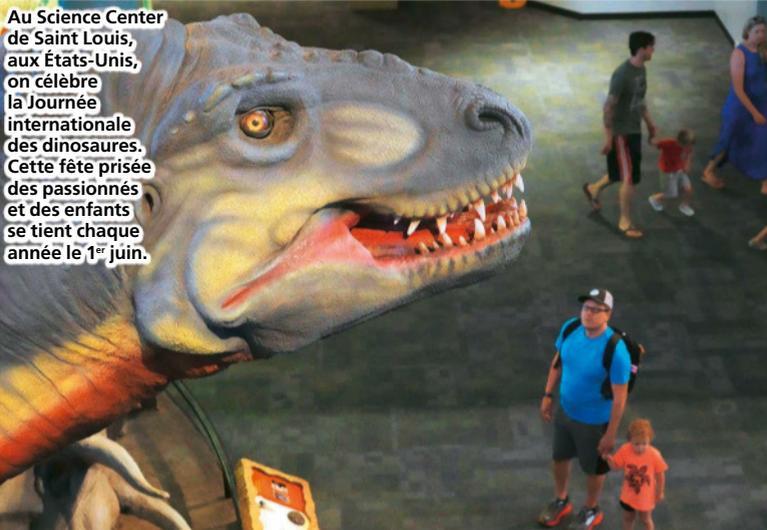
**M.M. :** On est fasciné par notre animalité. On a un rapport assez conflictuel avec la nature. Dans mon obsession à vouloir les représenter en train de se battre, mes recherches m'ont amenée à lire une théorie selon laquelle, au début du xx<sup>e</sup> siècle, les gens vivaient la guerre en direct et n'avaient peut-être pas envie de voir des dinosaures se battre. Nous, aujourd'hui, on les regarde s'entredéchirer... C'est peut-être parce que l'on canalise la violence de cette façon. L'imaginaire que l'on a des dinosaures en dit davantage sur l'humain que sur leur violence supposée.

**SVHS :** *Mais pourquoi n'est-on pas obsédé par les mammifères ou les reptiles ?*

**P.H. :** Les mammifères et les reptiles sont moins drôles et aucun n'a atteint la taille d'un certain nombre de dinosaures. Grâce au tyrannosaure, on comprend ce terme de "dinosaure", d'une puissance écrasante, qui terrifie, comme celle d'un tyran.

**M.M. :** C'est drôle de voir que l'on est focalisé sur les dinosaures. C'est vraiment notre extinction préférée. Pourquoi ne se focalise-t-on pas sur le Précambrien ? Peut-être parce que c'est trop lointain. Pour faire un film, il faut du sensationnel... c'est moins évident avec des trilobites.

Au Science Center de Saint Louis, aux États-Unis, on célèbre la Journée internationale des dinosaures. Cette fête prisée des passionnés et des enfants se tient chaque année le 1<sup>er</sup> juin.



**SVHS :** *On en revient toujours à ce besoin d'action...*

**M.M. :** Avec ses dessins de deinonychus sautillants, le paléontologue Robert Bakker met les dinosaures sur le devant de la scène. En revanche, il a une manière de présenter les mammifères qui est tout autre : nous sommes des boules de poils avec de petites mamelles qui habitons dans des trous. Il a montré que les dinosaures étaient les rois du monde, ce qui changeait complètement la vision que l'on en avait jusque-là : avant, ils étaient des ratés de l'évolution, car ils avaient disparu. Or, ils ont duré beaucoup plus longtemps que nous. Sans cette extinction, ils auraient continué à dominer.

**SVHS :** *Selon vous, les dinosaures fascinent parce qu'ils représenteraient nos aïeux disparus avec lesquels on a quelque chose à régler.*

**Pouvez-vous expliquer cela ?**

**P.H. :** Le biologiste américain, paléontologue et historien des sciences Stephen Jay Gould, expliquait cette fascination parce qu'ils sont "big, fierce and extinct", grands, féroces et éteints. Ils appartiennent au passé et ne peuvent revenir. C'est là où l'on peut faire le parallèle avec les aïeux. Pour des yeux d'enfants, ils peuvent être impressionnants. On leur donne une stature physique, mais aussi morale. Le côté féroce vient de ce qu'ils ont vécu : une éducation ferme, à l'ancienne, une vie plus rude avec des drames comme l'ont été les

## L'évolution des représentations du *Deinonychus antirrhopus*

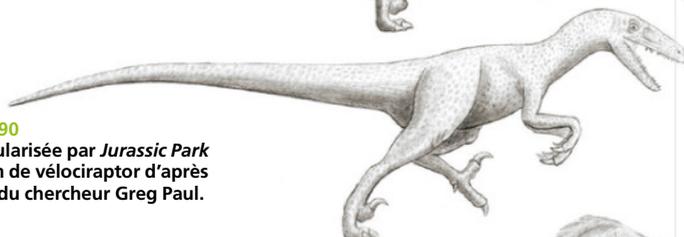
**ANNÉES 1960**

En 1969, le paléontologue Robert Bakker réalise le premier dessin de *Deinonychus antirrhopus*.



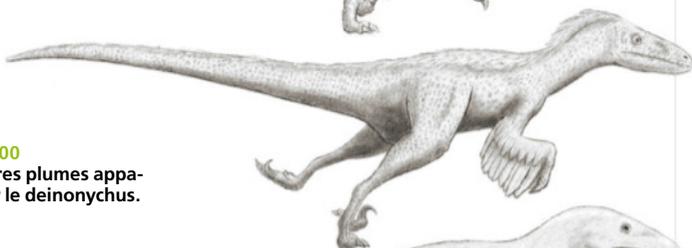
**ANNÉES 1990**

Image popularisée par *Jurassic Park* sous le nom de vélociraptor d'après les dessins du chercheur Greg Paul.



**ANNÉES 2000**

Les premières plumes apparaissent sur le deinonychus.



**AUJOURD'HUI**

Le paléoartiste Marco Anson le représente couvert de plumes, d'après les connaissances acquises jusqu'en 2016.



deux conflits mondiaux, par exemple, qui ont laissé des traces dans les familles. Enfin, éteints : ils emportent avec eux ces événements.

**M.M. :** C'est vrai que cette thèse des aïeux m'a rappelé un membre de ma famille qui, à 4 ou 5 ans, me semblait énorme. Je peux comprendre que pour un enfant, il y ait un côté fascinant. Les aïeux incluent notre passé, celui que l'on doit digérer et que l'on ne devrait pas recroiser ; et dans le même temps, on en garde des reliquats. C'est un joli parallèle, mais pourra-t-on le prouver un jour...

**SVHS :** *Ce "dinosaur" dans votre famille, Marion, c'est l'oncle Jean. Vous pensez que l'on a tous un non-dit familial qui active nos peurs, nos colères ?*

**M.M. :** Oui, il y a des non-dits dans toutes les familles, qui sont mal digérés et qui se transmettent. Alors quand ce non-dit revient, on ne sait pas très bien ce qu'il représente, un peu comme les fossiles de dinosaures, en fait. On sait qu'il y a un passé, on essaye de l'imaginer, on se fait peur avec... Le cerveau humain essaye toujours de broder un scénario.

**SVHS: Pour vivre heureux, faut-il se réconcilier avec son passé ?**

**M.M. :** En devenant adulte, on se rend compte que l'on est le produit de ce que nos parents, notre famille ont fait de nous. Mais ce qui est important finalement, ce n'est pas la façon dont on nous a façonnés, mais ce que nous en avons fait.

**P.H. :** On ne peut pas effacer le passé, mais on peut modifier les traces qu'il a laissées en nous. La vie psychique ne se transmet pas comme les choses matérielles. On n'hérite pas de contenus mentaux ou de traces d'expérience telles quelles. Il y a une refonte à chaque génération.

**SVHS: Est-ce que l'idée de ne pas savoir si les dessins scientifiques des dinosaures sont exacts ne nourrit pas notre intérêt ?**

**M.M. :** Oui ! Les représentations que l'on en a aujourd'hui sont fausses et vont encore évoluer. Le tyrannosaure, par exemple, vient de subir une petite rhinoplastie. Le pyroraptor que l'on voit dans le dernier *Jurassic World* a été trouvé par Ronan Allain et son collègue dans

les Bouches-du-Rhône : dans le film, il a des plumes, il est beau... Le paléontologue m'a montré les fossiles qu'ils ont découverts et qui ont servi à la reconstitution : une phalange, une dent et quelques os. Pour passer de ce peu d'éléments à une reconstitution comme on la voit dans le film, ils utilisent l'ensemble des connaissances dont on dispose déjà, puis ils complètent avec d'autres spécimens. Quel travail de puzzle fascinant ! Il y a une part d'interprétation folle de la part des artistes.

**SVHS: Dans les années 1930, dans la lignée de la pensée de Darwin, ils étaient vus comme des "loosers".**

**Qui seraient aujourd'hui ces losers ?**

**M.M. :** Peut-être que c'est nous ! Certains pensent que les losers, ce sont ceux qui ne résistent pas à l'homme. Ils se placent d'un point de vue très technophile : "Les pollinisateurs ? On les remplacera par des petits robots". En tout cas, les espèces qui disparaissent le font à cause de l'homme. Dire qu'il y a des losers ou des winners est une façon très "humaine" de voir les

choses. La nature est telle qu'elle est, mais l'homme présente une certaine incapacité à laisser faire les choses qui lui semblent dénuées de sens, sans logique ou sans hiérarchie.

**SVHS: L'extinction des dinosaures nous rappelle-t-elle notre propre "périssabilité" ?**

**M.M. :** Oui, j'ai retrouvé des articles des années 1990 et dans l'un d'eux il était écrit que le tyrannosaure, c'est nous. On sait qu'il est mort, que quelque chose de plus fort que lui l'a détruit. Ça fait un peu écho à l'humain, à notre brutalité.

**P.H. :** Dans la mesure où l'on sait comment ils ont disparu, on peut se projeter. Les pré-occupations actuelles concernant le bouleversement climatique s'expriment aussi bien dans la peur que dans la fascination de l'idée que l'on peut disparaître.

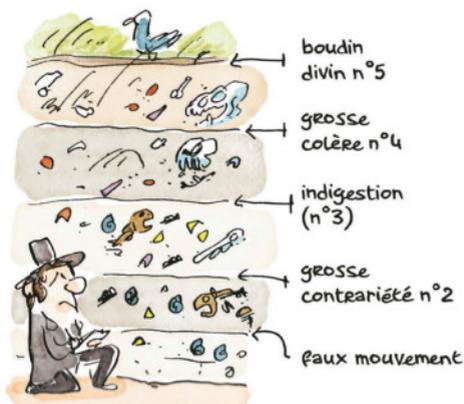
**SVHS: Finalement, nous vivons dans un monde qui a hérité des dinosaures. Est-ce que cette évolution nous permet de nous projeter dans un futur moins sombre ?**

**M.M. :** "La vie trouve toujours un chemin"... C'est un peu l'histoire de l'évolution. Je trouve ça complètement vertigineux. Le monde des dinosaures était totalement différent du nôtre, donc dans le futur ça le sera aussi. Et c'est bien la nature qui gagne à la fin. ■

\* Nos mondes perdus, sorti le 10 novembre 2023 (éd. Dargaud).  
\*\* Dinosaures sur le divan, paru en 1998 (éd. Aubier).

“ Il y a des non-dits dans toutes les familles. Alors quand ce non-dit revient, on ne sait pas très bien ce qu'il représente, un peu comme les fossiles de dinosaures, en fait ”

Pour rappel, Smith c'est celui qui avait découvert que Dieu a non seulement détruit en masse certaines de ses créations, mais qu'il a répété plusieurs fois cette petite manie!



L'extinction la plus connue (le "boudin divin"), la plus soudaine et cinématographique, c'est celle de la météorite qui a éclaté les dinosaures.



Ceux qui n'étaient pas directement tués sous l'impact ont été propulsés à plusieurs mètres du sol par l'onde de choc...



... et sont morts en retombant de tout leur poids...



... ou transpercés par une pluie de morceaux de verre brûlant (de la roche pulvérisée par l'impact).



15 % des espèces ont survécu... dont des mammifères.





Et s'ils n'avaient  
pas disparu ?



L'ombre inquiétante d'un ptérosaure volant au-dessus de la ville. C'est l'effet produit par l'installation du Royal Festival Hall, au Southbank Centre de Londres, à l'occasion du 350<sup>e</sup> anniversaire de la Royal Society.

Les dinosaures auraient-ils continué à dominer le monde ? Seraient-ils devenus plus intelligents ? Et quid des mammifères ? Les chercheurs s'intéressent très sérieusement à la question... PAR LISE GOUGIS

**S**elon les découvertes effectuées en 2017 par des géologues de l'université du Texas, il s'en est fallu de peu ! Il aurait suffi que l'astéroïde surgisse quelques secondes plus tôt ou plus tard dans l'atmosphère terrestre, voici 66 millions d'années (Ma), pour qu'il finisse sa course dans les eaux profondes du Pacifique ou de l'Atlantique, et non au Yucatán. Les conséquences de la catastrophe auraient alors été moins désastreuses, puisque la force de la collision aurait été en partie amortie par l'océan. Moins de roche aurait été vaporisée dans l'atmosphère. Des extinctions se seraient bien produites, mais ce scénario aurait laissé une chance de survie aux dinosaures. Et s'ils s'en étaient sortis, ou si l'astéroïde n'avait fait que frôler la Terre ce jour-là, que seraient-ils devenus ? Comment auraient-ils continué à évoluer ? *“On pourrait considérer ça comme de la science-fiction, mais ça soulève des questions profondes sur l'évolution”*, pointe Nicholas Longrich, paléontologue à l'université de Bath (Royaume-Uni).

#### UN SORT SCÉLÉ PAR LES GLACIATIONS

Certains scientifiques, à l'instar du paléontologue Michael J. Benton de l'université de Bristol (Royaume-Uni), estiment que le sort des dinosaures était déjà scellé et qu'ils n'auraient pas vécu beaucoup plus longtemps. *“Ils auraient commencé à décliner quand le climat s'est refroidi au cours de l'Éocène [il y a 56 à 34 Ma, NDLR], affirme le spécialiste. Ils n'auraient pas survécu aux glaciations du début de l'Oligocène voici 34 Ma, quand les températures ont chuté de 8°C en 400 000 ans. Les grands dinosaures auraient sans doute été les premières victimes, car ils n'auraient pas eu les ressources en nourriture nécessaires pour se maintenir.”* Les mammifères à sang chaud, eux, auraient mieux résisté au froid. Ils auraient pris l'ascendant. Autrement dit, nous, humains, aurions malgré tout dominé le monde, astéroïde ou pas.

Pour d'autres spécialistes au contraire, sans Chicxulub, le règne des dinosaures aurait continué longtemps. *“Quand la catastrophe est survenue, ils avaient dominé pendant 100 Ma, malgré des périodes de*



En 1982, le paléontologue Dale Russell imagine une évolution "humaine" du *Stenonychosaurus* – espèce ressemblant au *Deinonychus* –, s'il ne s'était pas éteint. Le résultat est ce spécimen mi-homme, mi-reptile, qu'il appelle "dinosaurioïde".

*réchauffement climatique, des baisses de température... Ils ont survécu à des éruptions volcaniques, des changements environnementaux, etc. Donc, ils auraient continué à s'adapter à leur environnement et je pense qu'ils seraient toujours là aujourd'hui, du moins leurs descendants*", analyse Steve Brusatte, paléontologue à l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni). À quoi auraient-ils pu ressembler? Certains chercheurs supposent que, dans la fournaise qui régnait il y a 56 Ma, au moment du maximum thermique du Paléocène-Éocène qui a vu les températures augmenter de 5°C à 8°C, les grands herbivores auraient pu rétrécir. Car à cette période, la végétation serait devenue très abondante, surtout les plantes à fleurs. Comme celles-ci sont plus nutritives et faciles à digérer que les fougères



Dans *After Man*, le paléontologue et biologiste Dougal Dixon donne un hypothétique aperçu des êtres qui pourraient habiter la planète 50 Ma après la disparition... des humains.

dont se nourrissaient les sauroïdes avant de disparaître, ils n'auraient plus eu besoin d'avoir un si gros estomac. Et quelques millions d'années plus tard, pour faire face aux périodes glaciaires, les dinosaures auraient pu se couvrir de plumes...

### DES MÂCHOIRES EXTENSIBLES

En 1988, dans son ouvrage *Les Nouveaux Dinosaures : l'autre évolution*, qui décrit un monde alternatif dans lequel l'extinction du Crétacé-Paléogène n'a pas eu lieu, le géologue écossais Dougal Dixon est allé jusqu'à dépendre des créatures à mi-chemin entre les dinosaures, les mammifères,

“ Sans l'astéroïde, nos petits ancêtres à fourrure n'auraient jamais pu émerger de l'ombre des dinosaures... et nous ne serions pas là aujourd'hui ”



les reptiles ou les oiseaux. Par exemple, *Caedosaurus gladiadens*, un maniraptore à dents de sabres ; ou encore *Ganeosaurus tardus*, un tyrannosaure qui aurait perdu ses bras, mais qui aurait été doté de mâchoires extensibles, comme les serpents. Toujours dans les années 1980, le paléontologue américain Dale Russell a poussé l'uchronie

encore plus loin en imaginant une Terre peuplée de "dinosaurioïdes", des dinosaures humanoïdes bipèdes à la peau verte et aux yeux immenses, dotés d'un gros cerveau et d'un pouce opposable leur permettant de manier des outils.

Mais pour Nicholas Longrich, les caractères physiques des "terribles lézards" auraient assez peu évolué au final. *"Quand on regarde l'évolution des dinosaures au cours des 150 Ma de leur existence, on remarque que ce sont les mêmes caractéristiques qui sont apparues encore et encore : des sauropodes à long cou colossaux, pouvant atteindre 30 m de long, et des carnivores géants mesurant une dizaine de mètres. Il y a certes eu quelques expériences nouvelles, comme le spinosaure, un dinosaure semi-aquatique, et des espèces à cornes. Mais les espèces de la fin du Crétacé restent très semblables à celles du Jurassique. Donc, s'il y avait encore des dinosaures aujourd'hui, je pense qu'ils ressembleraient fortement au T. Rex et au brontosaure."*

### UN T. REX BIEN PLUS INTELLIGENT

Quid de leur cerveau ? Auraient-ils pu devenir plus intelligents ? *"C'est vrai que le cerveau des dinosaures a eu tendance à grossir"*, poursuit Nicholas Longrich. Celui du tyrannosaure était plus volumineux que celui de l'allosaure, qui vivait 80 Ma plus tôt, mais il ne pesait que 400 g au regard de ses 5 t, contre 1,3 kg pour le nôtre. Toutefois, une étude américaine parue en janvier 2023 suggère que le T. Rex était bien plus intelligent qu'on ne le pense généralement : son cerveau comportait 3 milliards de neurones, soit presque autant qu'un chimpanzé. Autrement dit, si le prédateur avait eu l'occasion de vivre plus longtemps, il aurait peut-être eu la

*The right stork's powerful front legs are developed from the wings of its ancestors. Its back feet, which were originally used for grasping and clutching, now come over its shoulders and effectively form hands.*



Le "rôdeur nocturne" de Dougal Dixon dans *After man* possède de puissantes pattes développées à partir des ailes de ses ancêtres,

# Questions Réponses

## Qu'est-ce qui distingue un *Gastornis* d'un dinosaure théropode?

Deux mètres de hauteur, 180 kg : le *Gastornis*, un oiseau incapable de voler, compte parmi les plus grands animaux connus des écosystèmes continentaux du Paléocène. "Le pool d'oiseau qui a passé la crise Crétacé-Paléogène s'est énormément diversifié", indique Ronan Allain, paléontologue et chargé de la conservation des collections de reptiles et d'oiseaux fossiles au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). "Le *Gastornis* est apparu très tôt après la disparition des dinosaures." L'oiseau géant présente de nombreux points communs avec les dinosaures théropodes – le groupe de dinosaures carnassiers à partir duquel se sont individualisés les oiseaux. "Le *Gastornis* partage plus de 80 caractéristiques



anatomiques avec eux, précise Ronan Allain. Comme les plumes, présentes chez beaucoup de dinosaures théropodes." Mais nombre d'autres critères, propres aux oiseaux, les distinguent, notamment au niveau du squelette. "Chez le *Gastornis*, les membres antérieurs sont réduits, le fémur est beaucoup plus petit que le tibia, tous les os du bassin sont soudés entre eux, au point d'être quasiment indiscernables les uns des autres." Ses goûts alimentaires pourraient aussi s'être éloignés de ceux de ses ancêtres : des études récentes suggèrent qu'il était peut-être herbivore, contrairement à ce que la taille impressionnante de son bec laissait jusque-là penser. H. R.



## Comment les insectes ont-ils passé l'épreuve du K-Pg ?

À la suite de l'impact de Chicxulub, 75 % des espèces animales ont disparu. Mais l'étonnante robustesse des insectes a joué en leur faveur. À quoi ressemblaient ceux du Crétacé ? Certains fossiles sont parvenus jusqu'à nous, comme les larves de névroptères, des insectes dotés de quatre ailes membraneuses. D'après une étude parue en avril 2023 dans *Scientific Reports*, la diversité de ces larves était bien plus importante au Crétacé qu'actuellement. Cette diversité aurait joué en leur faveur. De plus, les insectes, petits, n'ont pas besoin de beaucoup de nourriture. Même si leur durée de vie est courte, leur reproduction est très rapide. Or, il était bien plus facile de survivre quelques jours

dans des conditions extrêmes plutôt que quelques années ! Les insectes cumulent d'autres avantages. D'une part, une variabilité d'habitats importante qui leur a permis de se réfugier partout où les conditions étaient favorables – dans les arbres morts comme sous les cendres. D'autre part, une malléabilité génétique record qui leur permet, en peu de cycles reproductifs, de trouver une combinaison plus adaptée à l'environnement. Enfin, une alimentation très diversifiée : alors que les autres espèces mouraient faute de nourriture convenant à leur estomac, les insectes ont su jouer les charognards... et tirer bénéfice des cadavres des espèces moins adaptées au nouveau monde qui s'offrait à eux. A. D.

## POURQUOI LES OISEAUX N'ONT-ILS JAMAIS DÉVELOPPÉ DE DENTS APRÈS L'EXTINCTION CRÉTACÉ-PALÉOÈNE ?

Tout simplement parce qu'ils n'en avaient pas l'utilité. Il y a 150 Ma, la lignée aviaire s'est différenciée des autres dinosaures carnivores. Les premiers de ces oiseaux – comme le plus connu d'entre eux, l'*Archaeopteryx* – avaient encore des dents. Mais chez certains, elles finissent par disparaître au cours du Crétacé. *"Les oiseaux ont développé des becs, toutes sortes de becs, à chaque fois adaptés à une fonction particulière"*, explique Ronan Allain, paléontologue et chargé de la conservation des collections de reptiles et d'oiseaux fossiles au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). *"Au cours de leur évolution, leurs dents ont cessé de pousser, car ils n'en avaient plus besoin. Cela s'est produit aussi chez d'autres dinosaures carnivores comme les oviraptoridés et ornithomimosaures."* Seuls les oiseaux "sans-dents" survivent à la grande extinction Crétacé-Paléogène. Or, il est rarissime que

l'évolution fasse machine arrière : quand une caractéristique biologique est perdue, elle ne réapparaît généralement pas. *"Les dents des oiseaux modernes ne sont pas vraiment inexistantes, nuance le scientifique. D'un point de vue génétique, et au stade embryologique, elles sont encore là. Par le biais de manipulations, il serait possible de faire s'exprimer les gènes qui commandent la pousse des dents."* Oui, les poules pourraient très bien avoir des dents ! H. R.



## À quoi ressemblaient les plantes qui ont disparu après Chicxulub ?

Quand la Terre s'est couverte d'un épais nuage de poussière, après l'impact de la météorite, la photosynthèse s'est arrêtée, faute de lumière. Certaines plantes ont néanmoins survécu jusqu'à notre époque, comme les *Cycas revoluta*, de type ligneux; ou les plantes à fleurs de type angiosperme. Mais d'autres n'ont pas eu cette chance. C'est le cas de multiples espèces de fougères à graines, telles les ptéridospermes

qui constellaient la surface de la Terre bien avant l'arrivée des conifères ou des plantes décidues. Les scientifiques le savent grâce aux fossiles retrouvés notamment aux États-Unis, en Colombie ou en Argentine. Hélas, ceux-ci s'apparentent à des puzzles incomplets: il y manque la forme des feuilles ou la ramification des racines... ce qui risque d'entretenir longtemps le mystère sur ces plantes disparues. A. D.



## Pourquoi les sauropodes étaient-ils si grands ?

Le gigantisme des dinosaures est rendu possible par la légèreté de leurs os. De nombreux sacs aériens participant à la respiration permettaient en effet de diminuer leur densité osseuse. De plus, leur métabolisme est peu énergivore et leur anatomie, avec des pattes alignées sous le corps, leur permettait de supporter leur poids. Les prédateurs bipèdes, les théropodes, étaient plus rapides que les herbivores quadrupèdes.

Devant mobiliser de l'énergie pour chasser, ils étaient plus "petits". Une étude parue en mai 2023 dans la revue *Current Biology* a analysé les os de 250 espèces, notamment les déformations qui permettent de déduire les masses de leurs propriétaires. Conclusion: la taille des sauropodes n'a cessé

de varier sur 100 Ma, selon l'abondance de nourriture ou la pression des prédateurs que seul dissuadait le gigantisme de leurs proies. Du Jurassique jusqu'à la fin du Crétacé, certaines espèces sont devenues géantes, tel *Breviparopus* (33 m de long pour 62t), ou le mastodonte *Argentinosaurus* (35 m de long pour 80t). Les

titanosaures tels que *Patagotitan* mesuraient plus de 37 m et pesaient jusqu'à 57t. D'autres sauropodes gardaient une taille plus "mesurée", tel l'*Alamosaurus* (26t pour une longueur de 20 m) qui hantait l'Amérique

du Nord au Crétacé. Malheureusement pour ces mastodontes, grands ou "petits", c'est bien leur taille qui, in fine, provoqua leur disparition complète. A. D. et P.-E. L.-G.

# 64 SCIENTIFIQUES QUI ONT FAIT L'HISTOIRE !



**À travers ce hors-série des Cahiers de Science & Vie, découvrez les portraits de celles et ceux qui ont fait ces grandes découvertes scientifiques.**

- 64 portraits de scientifiques qui incarnent l'histoire et le progrès de la science.
- Un voyage à travers les époques et **5 disciplines majeures** : l'astronomie, la chimie, la biologie, les mathématiques et la physique.
- Des rubriques simples et concises : frises chronologiques, grandes découvertes, controverses, contexte social et scientifique...

À offrir  
ou à s'offrir  
**19€<sub>90</sub>**

Hors-série Les Cahiers Science&Vie.  
148 pages. Dimensions : 19,5 x 27 cm.

**EN VENTE CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX**

ou sur [www.kiosquemag.com/boutique](http://www.kiosquemag.com/boutique) ou par téléphone 01 46 48 48 03 (paiement en CB uniquement) ou par courrier ▼

**BON DE COMMANDE** à retourner sous pli affranchi à la boutique Science&Vie -59898 Lille Cedex 9

Oui je commande	Réf	Qté	Prix	Total
ILS ONT MARQUÉ LA SCIENCE	429 639		19,90 €	
Envoi en COLIECO. Livraison : 3 semaines après enregistrement de ma commande.				+ 4,00 €
<b>MONTANT TOTAL DE MA COMMANDE</b>				<b>€</b>

Je règle par chèque joint libellé à l'ordre de Science&Vie.



Vous souhaitez régler par carte bancaire ? Rapide, simple et 100% sécurisé, rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)

Offre valable France Métropolitaine valable jusqu'au 30/06/2024 dans la limite des stocks disponibles. Conformément à l'article L.221-18 du code de la consommation, vous disposez d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception de votre commande et vous pouvez retourner votre colis dans son emballage d'origine complet. Les frais d'envoi et de retour restent à votre charge. Les informations demandées sont destinées à la société REWORLD MEDIA MAGAZINES (KiosqueMag) à des fins de traitement et de gestion de votre commande, d'opérations promotionnelles, de fidélisation, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à [dpd@reworldmedia.com](mailto:dpd@reworldmedia.com). Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - [www.cnil.fr](http://www.cnil.fr). Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com).

**MES COORDONNÉES** (\* A remplir obligatoirement)

# M091 # V 1545532

Nom\*

Prénom\*

Adresse\*

Code Postal\*  Ville\*

E-mail (Votre adresse e-mail ne sera pas communiquée à des partenaires extérieurs à des fins commerciales)

Téléphone portable de prêt.  Date anniversaire

(Pour envoi de sms si problème de livraison)

(Pour fêter votre anniversaire)

- Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège de Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. **Domage !**
- Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. **Domage !**



## QUE NOUS APPRENNENT LES GRAINS DE POLLEN PRÉHISTORIQUES?

Pour le savoir, il faut s'intéresser à la palynologie, c'est-à-dire l'étude des grains de pollen et des spores, et à la paléopalynologie, qui étudie leurs microfossiles. Les palynologues sélectionnent d'abord la pierre qu'ils vont dissoudre: "Nous faisons agir un certain nombre de produits, notamment des acides, pour éliminer la fraction minérale", décrit Bernard Gomez, chercheur CNRS au laboratoire de géologie de l'université de Lyon. "Cela nous permet de récupérer uniquement la fraction organique, non minéralisée, parmi laquelle on trouve de petits éléments comme des spores et des grains de pollen." Les grains de pollen ont la particularité d'avoir une couche extérieure, la paroi appelée exine, très résistante. "Ce qui est préservé n'est pas la structure telle qu'elle était

de son vivant, mais uniquement cette partie externe protectrice composée de sporopollénine. Les autres éléments sont plus fragiles", poursuit le chercheur. Retrouvée dans des roches sédimentaires datant de 500 Ma, la sporopollénine est même considérée comme l'un des matériaux organiques naturels les plus résistants au monde. "Les molécules qui la composent sont à l'épreuve des ultraviolets, de la chaleur et de la fossilisation", ajoute Bernard Gomez. La sporopollénine a été mise en place par les plantes au cours de l'évolution et notamment du Crétacé pour permettre le développement de plantes terrestres." Leur étude est utile pour apporter des informations stratigraphiques sur une roche, pour donner des âges relatifs. Elle permet de reconstituer des paysages anciens. A. C.



## POURQUOI AUCUN DES PETITS DINOSAURES N'AIT-IL SURVÉCU?

À la fin du Crétacé, la taille modeste des mammifères et des ancêtres des oiseaux modernes a joué en leur faveur. Mais alors, pourquoi n'est-ce pas le cas des dinosaures non aviens de petite taille? Tout d'abord parce que la plupart des plus menus, tel le *Compsognathus*, vivaient surtout au Jurassique. À la fin du Crétacé, le plus petit des dinosaures était le *Micropachycephalosaurus*... d'un mètre de long tout de même! Deuxième argument des paléontologues: les dinosaures ont tout simplement joué de malchance, contrairement aux quelques rares espèces d'oiseaux et de mammifères qui ont survécu. A. D.



# ROBOBOX

## SCIENCE & VIE

Bientôt Noël!  
Faites-vous  
offrir des box  
en cadeau !

# APPRENEZ LES BASES DE LA ROBOTIQUE À TOUT ÂGE !



Robobox est la méthode indispensable pour apprendre les bases de la robotique et de la programmation, en construisant, chaque mois, un robot toujours plus évolué. Vivez votre passion de la robotique en découvrant, à l'aide des différents kits, de nouvelles notions de mécanique, de programmation ou d'électronique.



3 NIVEAUX DE DIFFICULTÉ ET 12 BOX POUR APPRENDRE !

TOUTES NOS OFFRES SUR [ROBOBOX.FR](http://ROBOBOX.FR)

à partir de

**32,99**  
€  
par kit



**ROBOBOX**  
SCIENCE & VIE

Pour les 8-13 ans



**ROBOBOX**  
SCIENCE & VIE

À partir de 14 ans



**ROBOBOX**  
SCIENCE & VIE

Pour les adultes



**SCIENCE & VIE**

VOYAGES

**Nouveauté**

A partir de

**1699€** par personne

**TOUT COMPRIS**

Au départ de France\*

# Cet hiver, découvrez notre séjour au cœur de **LA LAPONIE SUÉDOISE**

Départs jusqu'en mars 2024

Safari en chiens de traîneau



Motoneige



Visite d'une ferme d'élan



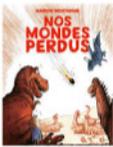
Profitez d'activités uniques au cœur de la Laponie suédoise !





**THE DINOSAURIA**  
de 43 auteurs dont  
David B. Weishampel,  
Peter Dodson et Halszka  
Osmólska, éd. University  
of California Press, 2007, 853 p., 54,22 €.

Il s'agit là d'une véritable bible, régulièrement actualisée depuis 1990. On y trouve la description de nombreuses espèces et une multitude d'informations sur le comportement, l'alimentation, la reproduction, l'anatomie, l'évolution et l'environnement des dinosaures. Disponible uniquement en anglais.



**NOS MONDES PERDUS**  
de Marion Montaigne,  
éd. Dargaud, 2023,  
208 p., 24,50 €.

Comment sait-on que les représentations que nous avons des dinosaures sont dans le vrai ? Cette question a poussé la dessinatrice scientifique à se lancer dans une quête paléontologique et remonter le temps jusqu'à la naissance des

sciences naturelles et la découverte des tout premiers fossiles. Une BD qui retrace, non sans humour, une guerre des os fratricide entre Edward Cope et Charles Marsh, l'élaboration de la loi de subordination des organes par Georges Cuvier, le regain d'intérêt pour les dinosaures sous le pinceau de Robert Bakker... jusqu'à la fascination exercée par *Jurassic Park*.



**LE TRIOMPHE ET LA CHUTE DES DINOSAURES : LA NOUVELLE HISTOIRE D'UN MONDE OUBLIÉ**

de Steve Brusatte, éd. Quanto, 2021, 356 p., 22 €.

Le paléontologue Steve Brusatte a écrit ce livre comme s'il était "un détective des temps reculés", selon ses propres mots. Une enquête qui s'appuie sur les fossiles que lui et ses équipes ont mis au jour, agrémentée de plus de 70 illustrations et photographies originales. Ce travail et les conclusions scientifiques sont racontés ici pour retracer

# C'EST

l'avènement, l'évolution et la chute de ces géants du Mésozoïque.



**LE TRIOMPHE ET LE RÈGNE DES MAMMIFÈRES : LA NOUVELLE HISTOIRE, DE L'OMBRE DES**

**DINOSAURES À AUJOURD'HUI**  
de Steve Brusatte, éd. Quanto, 2023, 496 p., 24,50 €.

Après les dinosaures, Steve Brusatte s'attaque à la vie des premiers mammifères dans ce livre qui se lit comme un carnet de voyage. Il y mêle récits de fouilles, photos, rencontres et découvertes scientifiques pour nous plonger dans l'histoire de l'évolution des survivants de l'extinction du K-Pg. Une aventure folle qui a permis de voir s'épanouir les trois lignées actuelles de mammifères : les

**"Dans le monde aujourd'hui (...), il y a environ 14 000 espèces d'oiseaux. Et il y a quelque 6 500 espèces de mammifères. Ceci veut dire que, actuellement, dans le monde, il y a plus du double de dinosaures que de mammifères. Réfléchissez à ça !"**

STEVE BRUSATTE, PALÉONTOLOGUE, CONFÉRENCE AU MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE DE PARIS (10 OCTOBRE 2023)



# C'EST



**"Les enfants et les adultes du monde entier étaient fascinés par ces géants disparus et, bien entendu, nous étions tous fascinés par les dinosaures. Mais les mammifères du Crétacé étaient notre priorité, et alors que la plus grande difficulté dans la mise au jour des squelettes de dinosaures était liée à leur taille énorme, le problème dans la recherche des mammifères du Crétacé était leur petite taille."** ZOFIA KIELAN-JAWOROWSKA, *IN PURSUIT OF EARLY MAMMALS* (2013)

# ÉCRIT

euthériens, les métathériens et les monotrèmes. Ce livre, c'est un peu l'histoire de l'humanité.

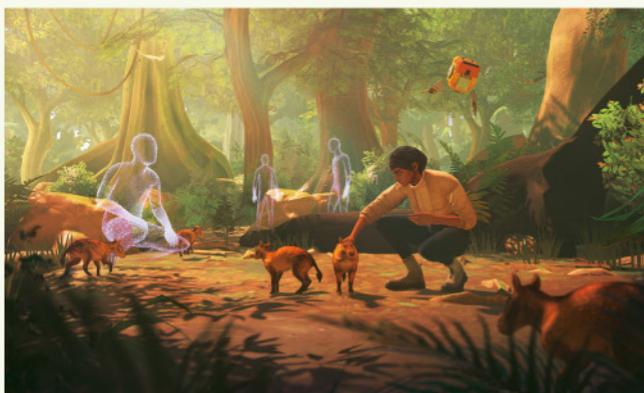


## LES DINOSAURES TELS QU'ILS ÉTAIENT VRAIMENT

de Michael Benton,  
éd. Eugen Ulmer Eds,

2021, 239 p., 21 €.

En 2010, ce chercheur de l'université de Bristol révélait les motifs roux et blanc ornant la queue du *Sinosauropteryx*, petit dinosaure vivant en Chine au Crétacé. Une première ! Depuis, les représentations des dinosaures se sont couvertes de couleurs et de plumes, et le paléontologue a publié cet ouvrage à l'iconographie réalisée par l'artiste Bob Nicholls. L'album, victime de son succès, n'est aujourd'hui disponible qu'en occasion.

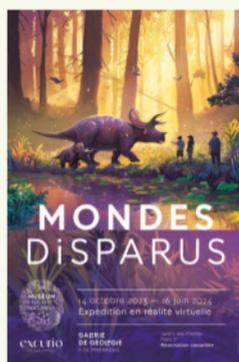


## EXPO

### "MONDES DISPARUS"

Jusqu'au 16 juin 2024, galerie de géologie et de minéralogie, 36 rue Geoffroy-Saint-Hilaire, Paris V<sup>e</sup>. [Mnhn.fr](http://Mnhn.fr)

Imaginez pouvoir traverser les temps géologiques de la Terre en remontant 3,5 milliards d'années en arrière, jusqu'en 2200, avec la prochaine extinction en cours ! C'est ce qu'il est possible de faire grâce à cette exposition en réalité virtuelle qui vous amène à la rencontre de la faune et de la flore de l'Archéen, du Cambrien, des dinosaures du Crétacé... Cette expérience scientifique, artistique et immersive a été imaginée par les paléontologues, paléobotanistes, bioacousticiens et autres chercheurs du Museum national d'histoire naturelle.

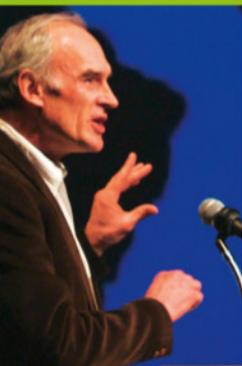


# DIT



**"La majorité des élèves quittaient l'école en croyant dur comme fer que les dinosaures avaient disparu parce que Noé n'avait pas assez de place pour eux sur l'arche."** TRISTAN EGOLF,

ÉCRIVAIN AMÉRICAIN, *LE SEIGNEUR DES PORCHERIES* (1998)



**"Si un dinosaure peut éventuellement devenir un oiseau-mouche, alors tous les espoirs sont permis."**

RONALD WRIGHT, HISTORIEN ET AUTEUR CANADIEN, *CHRONIQUE DES JOURS À VENIR* (2007)

**"C'est fini. Nous ne sommes pas faits pour survivre..."**

ALADAR, DANS LE FILM D'ANIMATION *DINOSAURE* DES STUDIOS DISNEY (2000)





La boutique

**SCIENCE & VIE**

# Le cadeau de Noël pour jouer en famille, à tout âge.

**3**

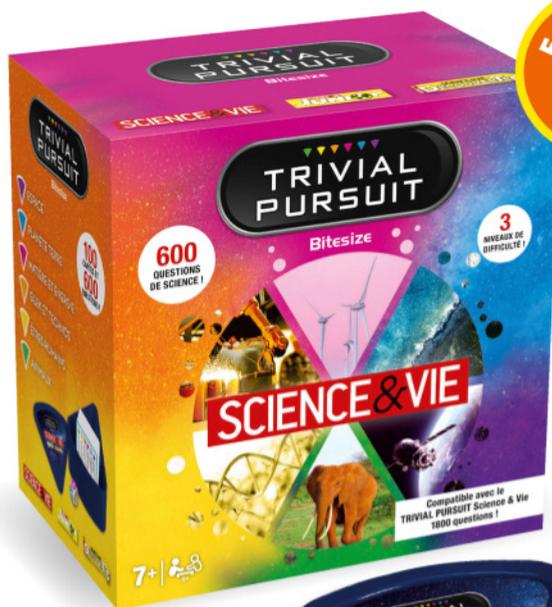
NIVEAUX DE DIFFICULTÉ

**600**

QUESTIONS DE SCIENCE

**3**

CATÉGORIES



**À PARTIR DE 7 ANS**

**LE JEU FORMAT VOYAGE : 20 € SEULEMENT**

**600 questions de science**, pour jouer partout, en famille et à tout âge. **Ce jeu peut venir compléter la version grand format avec ses nouvelles questions !** Chaque joueur peut choisir son niveau de difficulté. Ainsi les adultes et les juniors peuvent enfin jouer à armes égales !

**En vente dans vos magasins de jouets  
ou en ligne sur [www.kiosquemag.com/boutique](http://www.kiosquemag.com/boutique)**

À partir de 2 joueurs, pour les 7 ans et plus ! Jeu de société Science & Vie. Dimensions : 13,7 x 13,4 x 8,5 cm. Poids : 378 g. Contenu : 100 cartes de questions/réponses, 1 boîtier à cartes, 1 dé et 1 règle du jeu.





# MONDES DISPARUS



14 octobre 2023 — 16 juin 2024  
Expédition en réalité virtuelle

**GALERIE  
DE GÉOLOGIE  
& DE MINÉRALOGIE**

Jardin des Plantes  
Paris 5<sup>e</sup>  
**Réservation  
conseillée**



**excurio**  
Expéditions Immersives



**france.tv**

