

d'œil sur un ouvrage (ce qui est admis dans les bibliothèques ou dans les librairies) disparaîtrait. Feuilletter des ouvrages «en ligne», sans autorisation préalable, serait considéré comme une violation de la loi.

Les universités et les autres organismes qui fournissent des accès au réseau *Internet* sont particulièrement préoccupés par cette proposition de la Commission, qui prévoit qu'ils seraient responsables des infractions à la législation sur les droits d'auteur commises par leurs utilisateurs. Cette situation les obligerait à faire la police informatique, en les obligeant de vérifier la légitimité de données que les étudiants, le personnel ou les utilisateurs lisent ou publient.

Un équilibre nécessaire

Si la Commission propose un futur très éloigné de la tradition d'un accès public aux données, des moyens techniques très simples pourraient contourner ces obstacles. La Commission insiste sur les aspects techniques de transmission et de résidence des données, mais de nombreux spécialistes trouvent leur analyse insuffisante sur ce plan. Un examen plus complet des possibilités techniques de transfert de fichiers, qui inclut les méthodes de codage pour limiter le nombre de copies permanentes lors du transfert, pourrait étendre les travaux de la Commission.

D'autre part, pour que l'accès aux documents informatiques sans paiement systématique de droits soit admis dans certains cas, on doit se préoccuper de l'usage loyal du copiste et tenir compte de ce droit pour déterminer un compromis entre le respect des droits des auteurs et ceux des utilisateurs. Un tel compromis fut déjà recherché dans le cas de la photocopie des ouvrages imprimés.

La définition de l'usage loyal du copiste reste toutefois ambiguë dans le cadre des réseaux informatiques. La Commission l'envisage peu, bien qu'elle précise que la notion d'usage loyal doit perdurer dans le monde des connexions informatiques, et que sa nécessité diminuera avec la généralisation des licences et d'autres moyens de paiement automatique. Les représentants des utilisateurs et des lecteurs regrettent ces imprécisions troublantes. Si la Commission a pris

une position ferme en faveur des droits des auteurs, elle n'a pas su clarifier les droits des utilisateurs.

Elle a cependant continué à réunir informellement, chaque mois, des utilisateurs, des auteurs, des bibliothécaires, des avocats et des représentants des éditeurs, pour essayer d'élaborer des recommandations précises sur la notion d'usage loyal. Les premières réunions ont montré qu'un accord ne sera sans doute pas atteint avant les discussions devant les députés.

Pourtant ce désaccord n'est peut-être pas mauvais. Certes, les deux camps craignent qu'en l'absence de recommandations claires sur la notion d'usage loyal, les utilisateurs, telles les universités, seront gênés par l'ambiguïté de la loi. Toutefois, les lois doivent être élaborées dans le calme et la réflexion. L'absence de réglementation spécifique permet aux éditeurs, aux bibliothèques et aux autres organismes universitaires de procéder à des expériences sur la consultation électronique de documents, généralement dans le cadre d'accords écrits.

Les détenteurs des droits d'auteur semblent encore loin de poursuivre en justice les bibliothèques et les écoles. Les scientifiques ou les enseignants qui créent des pages *Web* sont parfois, formellement, dans l'illégalité, mais ils sont rarement poursuivis. Et s'ils l'étaient plus qu'aujourd'hui, l'avenir de la distribution électronique de l'information s'assombrirait.

Pour de nombreux participants des groupes informels de discussion, les désaccords méritent d'être entretenus. Beaucoup pensent que la technique n'est pas suffisamment au point pour que l'on établisse des directives claires sur la notion d'usage loyal. Ils rechignent à faire des recommandations législatives tant que toutes les implications ne sont pas claires. Il faudra encore attendre pour parvenir à un compromis acceptable sur la notion d'usage privé.

Malgré toutes les critiques que certains aspects du rapport Lehman ont suscitées, un certain consensus existe. Dans de nombreux cas, les réactions provoquées par les recommandations ne concernaient pas leur adéquation au fond du problème, mais jusqu'à quel point elles devaient être codifiées dans les textes de loi. Si presque tout le monde juge illicite le piratage des programmes conçus pour empêcher la copie d'une œuvre, les seules questions

posées concernaient l'étendue des sanctions encourues pour ce délit et la possibilité de présumer l'existence d'une faute.

De même, à l'exception de la petite minorité qui refuse les droits d'auteur sur *Internet*, tout le monde s'accorde à reconnaître qu'il est urgent de mieux informer les citoyens sur leurs obligations face à la loi. À une époque où chacun est un éditeur potentiel pourvu qu'il possède un ordinateur et un modem, les textes qui régissaient le comportement de quelques entreprises s'appliqueront à des millions de personnes.

La prochaine loi sur la protection des droits d'auteur déterminera l'avenir des techniques d'information. La puissance de ces nouvelles techniques bouleverse les habitudes de travail du monde créatif et les moyens par lesquels les auteurs et les éditeurs publient les œuvres. Peut-on simultanément satisfaire les utilisateurs, qui veulent accéder simplement à une information bon marché, et les auteurs et éditeurs, qui entendent tirer des publications les moyens honorables de leur subsistance? Nous devons agir sagement pour que tous les acteurs et les utilisateurs des nouvelles techniques profitent de la révolution de l'information.

Ann OKERSON, bibliothécaire adjointe de l'Université de Yale, travaille sur la consultation électronique des ouvrages.

B. EDELMAN, *La propriété littéraire et artistique*, Collection Que sais-je?, PUF.

A. LUCAS, *Propriété littéraire et artistique*, Collection Connaissance du droit, Dalloz, 1994.

P. SIRINELLI, *Industries culturelles et nouvelles techniques, Rapport de Commission*, ministère de la Culture et de la Francophonie / La documentation française, 1994.

O. ITEANU, *Internet et le droit, Aspects juridiques du commerce électronique*, éditions Eyrolles, 1996.

P. GOLDSTEIN, *Copyright's Highway : From Gutenberg to the Celestial Jukebox*, Hill and Wang, 1994.

Pour plus d'informations sur les lois américaines concernant les droits d'auteur :

- <http://www.library.yale.edu/~okerson/copyproj.html>

La plus importante des extinctions en masse

DOUGLAS ERWIN

Une des plus grandes catastrophes a frappé la Terre il y a 250 millions d'années : une extinction massive d'espèces a notablement modifié le développement de la vie.



1. LE NIVEAU DE LA MER a commencé à baisser il y a environ 260 millions d'années, mais le phénomène s'est accéléré à la fin du Permien, détruisant les habitats côtiers et déstabilisant le climat.

FORAMINIFÈRES

CORAIL
RUGUEUX

2. LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE en dioxyde de carbone a augmenté en raison de l'oxydation de la matière organique : la Terre s'est réchauffée, et la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau a diminué.



RÉCHAUFFEMENT
À LONG TERME

REFROIDISSEMENT
À COURT TERME

3. DE VIOLENTES ÉRUPTIONS VOLCANIQUES se sont déclenchées il y a environ 255 millions d'années et ont duré quelques millions d'années ; à court terme, elles ont d'abord entraîné un refroidissement de la Terre, puis, à plus long terme, un réchauffement et une diminution de la couche d'ozone.

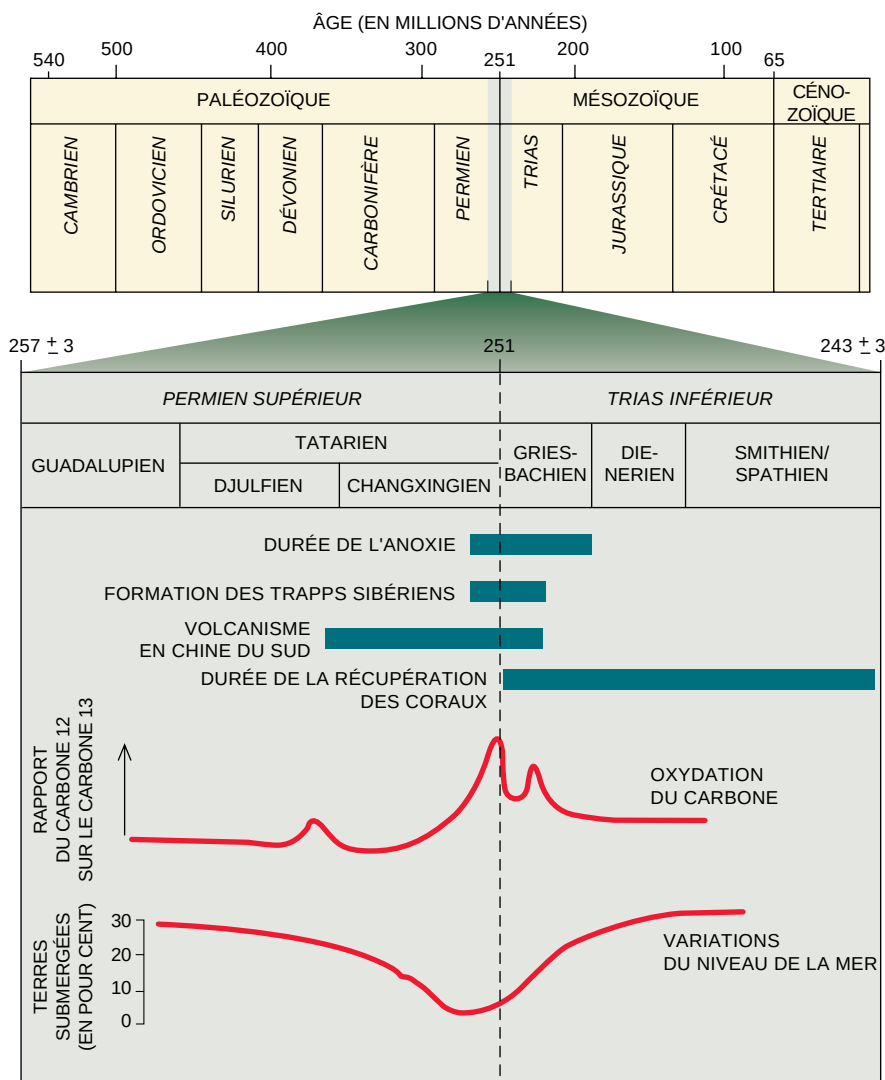
SPORES
DE CHAMPIGNONS

L'histoire de la vie sur Terre est pleine de catastrophes. L'une des plus connues eut lieu il y a 65 millions d'années : à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire, la moitié des espèces, notamment les dinosaures, auraient disparu. Les règnes végétaux et animaux furent bouleversés, mais bien moins qu'après l'extinction en masse qui eut lieu il y a 250 millions d'années, à la fin du Permien. Les victimes furent innombrables : près de 90 pour cent des espèces marines disparurent au cours du dernier million d'années du Permien ; parmi les espèces terrestres, plus des deux tiers des familles de reptiles et d'amphibiens, et 30 pour cent des ordres d'insectes s'éteignirent. C'est l'unique extinction en masse que les insectes aient jamais subie.

Toutefois cette catastrophe a favorisé le développement des espèces marines mobiles. Durant plusieurs centaines de millions d'années, jusqu'à la fin du Permien, les mers peu profondes ont été peuplées de formes de vie quasi immobiles. La plupart des animaux marins reposaient sur le fond ou y étaient fixés par des pédoncules, filtrant l'eau pour puiser leur nourriture ou attendant que passe une proie. Après l'extinction du Permien, plusieurs groupes mineurs – des prédateurs mobiles, ancêtres de nos actuels poissons, calmars, escargots et crabes – se développèrent. Des lignées nouvelles apparurent. Cette réorganisation complète a constitué une charnière dans l'histoire de la vie, qui sépare le Permien et le Trias, marquant la fin du Paléozoïque et le début du Mésozoïque.

4. LA REMONTÉE DES EAUX, après que les mers ont atteint leur plus bas niveau, a eu deux conséquences : les communautés littorales ont été menacées et de vastes régions ont été inondées par des eaux stagnantes.

1. PLUSIEURS CATACLYSMES se sont combinés pour éliminer la quasi-totalité des espèces vivant sur la Terre, à la fin du Permien, il y a environ 250 millions d'années. Les communautés inféodées aux rochers et aux hauts-fonds, notamment les coraux, les crinoïdes et les foraminifères, furent particulièrement touchées. Sur les continents, plus des deux tiers des reptiles et des amphibiens, et près d'un tiers des insectes disparurent. L'accumulation de spores de champignons indique que de nombreuses plantes auraient également disparu.



2. LA DÉGRADATION DE L'ENVIRONNEMENT, à la fin du Permien, est attestée par diverses données géochimiques et par les fossiles. Du carbone fut oxydé en grande quantité, le niveau des mers commença à baisser, et des éruptions volcaniques eurent lieu là où sont aujourd'hui localisées la Sibérie et la Chine. Certaines zones océaniques se sont appauvries en oxygène. Les coraux ont recommencé à abonder au milieu du Trias seulement.

Au cours des dernières années, la plupart des sciences de la terre ont contribué à la compréhension des causes et des conséquences de la crise de la fin du Permien. Les géologues, notamment, ont étudié les modifications rapides de la chimie des océans, établi des diagrammes d'extinction et montré que de violentes éruptions volcaniques avaient eu lieu entre la fin du Permien et le début du Trias.

Curieux des événements qui ont façonné l'évolution, je me suis interrogé sur les contributions respectives des extinctions en masse et des adaptations à long terme. Pourquoi les oursins, présents aujourd'hui dans tous les océans, étaient-ils rares durant le Permien ? Un seul genre, *Miocidaris*, semble avoir survécu à l'extinction : est-ce un hasard, ou était-il mieux

adapté ? Les oursins d'aujourd'hui seraient-ils différents s'il n'y avait pas eu l'extinction de la fin du Permien ?

Quelques bonnes roches

Pour répondre à de telles questions, on doit explorer les causes de la catastrophe et chercher quelles sont les différences entre les espèces qui ont survécu et celles qui ont disparu. Les roches et les fossiles sont des livres que déchiffrent les géologues, mais les échantillons de la fin du Permien et du début du Trias sont rares. Les fossiles datant de la limite entre les deux périodes sont mal conservés ou difficilement accessibles. En raison d'une baisse notable du niveau des mers, à la fin du Permien, peu de roches marines sont déposées sur la terre ;

en outre, les géologues accèdent difficilement à certaines régions riches en roches intéressantes, telles que le Sud de la Chine.

Où et à quelle vitesse la vie s'est-elle éteinte ? Erik Flügel et ses collègues de l'Université d'Erlangen, qui ont analysé des récifs en Chine du Sud et en Grèce, ont montré que certaines espèces, notamment les plus sensibles aux changements de l'environnement, disparaissent rapidement. Pour d'autres espèces, la disparition fut plus progressive : en étudiant la faune très riche et bien conservée des affleurements calcaires de l'Ouest du Texas, du Nouveau Mexique et de l'Arizona, j'ai découvert que de nombreux escargots ont commencé à disparaître vers la fin du Permien moyen, bien avant le pic d'extinction proprement dit.

Des études récentes des couches de la limite Permo-Trias, en Italie, en Autriche et dans le Sud de la Chine, ont montré que la durée de l'extinction a été plus courte qu'on ne l'avait cru : des conditions environnementales désastreuses se sont installées brusquement, et la période d'extinction, d'abord estimée à quelque cinq à dix millions d'années, n'aurait duré guère plus d'un million d'années.

Selon Steven Stanley, de l'Université Johns Hopkins, l'extinction aurait été marquée par deux événements brefs, l'un survenant à la fin du Permien moyen, l'autre à la fin du Permien supérieur. La datation de cendres volcaniques trouvées dans le Sud de la Chine devrait bientôt donner une meilleure idée de la durée de cette période d'extinction, qui semble avoir été aussi courte que les autres extinctions en masse.

Au cours de cet intervalle de temps, bref à l'échelle géologique, le schéma des extinctions et des spéciations a été complexe pour les groupes océaniques. La quantification des ordres, familles, genres et espèces qui ont disparu est difficile, mais on admet que 49 pour cent des familles et 72 pour cent des genres auraient été éliminés. Les estimations concernant le nombre des espèces disparues sont moins précises. Yin Hongfu et ses collègues de l'Université chinoise de géosciences ont examiné, au Sud de la Chine, la couche rocheuse qui définit l'étage changxingien. Avec le Djulfien, cet étage caractérise la plus tardive des deux subdivisions du Permien supérieur ; ces étages sont nommés d'après

la région du monde où les fossiles sont les mieux conservés.

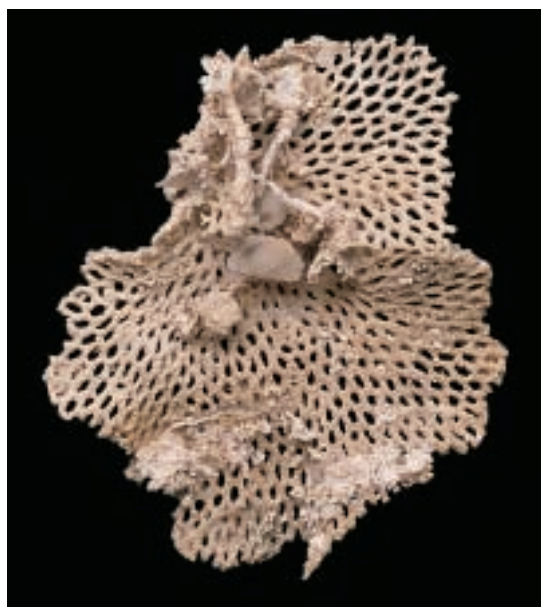
D'après cette étude, 435 des 476 espèces d'invertébrés du Permien supérieur disparurent (c'est-à-dire 91 pour cent). D'autres estimations sont comprises entre 80 et 95 pour cent, la limite inférieure étant sans doute la plus réaliste. Par comparaison, l'extinction qui eut lieu à la fin de la période ordovicienne, il y a 439 millions d'années, n'élimina que 57 pour cent des genres marins, et l'extinction qui fit disparaître les dinosaures toucha 47 pour cent de tous les genres.

La catastrophe de la fin du Permien frappa certains animaux plus dure-

ment que d'autres. Les groupes fixés sur les fonds marins, qui filtraient la matière organique contenue dans l'eau pour se nourrir, furent particulièrement touchés. Il s'agit notamment des coraux, des brachiopodes articulés (une sorte d'invertébrés à coquille), de bryozoaires (des animaux filtreurs qui vivent en colonie) et de divers échinodermes (les crinoïdes ou lys de mer). Parmi les autres groupes marins décimés se trouvent les derniers trilobites, les foraminifères des eaux peu profondes (un des constituants du zooplancton) et les ammonoïdes (des espèces apparentées aux nautilus). Les escargots, les bivalves et les nautiloïdes

traversèrent assez bien cette période, ne perdant que quelques groupes. Les conodontes furent les seuls animaux marins qui restèrent indifférents au chaos ; ce sont des organismes primitifs dont les pièces buccales, bien conservées, sont très utiles pour la datation des roches.

Les espèces terrestres furent également touchées. Les vertébrés et les insectes subirent des pertes notables : 78 pour cent des familles de reptiles et 67 pour cent de celles des amphibiens disparurent au cours du Permien supérieur. Toutefois la vitesse d'extinction reste débattue : d'après les premières études des fossiles de la région



3. AU PERMIEN, les bryozoaires (à gauche) et les brachiopodes (à droite) abondaient dans les océans (largeur : 40 millimètres environ).



4. PARMI LES VICTIMES DE LA CRISE DE LA FIN DU PERMIEN figure la faune de la région du Karroo, en Afrique du Sud, où l'on a retrouvé cet



Oudendon (un reptile mammalien) de 36 centimètres de long (à gauche). Cette ammonite de neuf centimètres (à droite) provient du Texas.

du Karroo, en Afrique du Sud, on avait conclu que le déclin s'était étalé sur plusieurs millions d'années, avec deux périodes d'extinction particulièrement rapides, mais d'autres travaux, plus récents, montrent un déclin plus bref, semblable au rythme de l'extinction marine.

L'extinction de nombreuses espèces d'insectes a transformé cette faune. Sur les 27 ordres d'insectes connus au Permien, huit se sont éteints près de la limite Permo-Trias, quatre ont été décimés mais ont pu se reconstituer ensuite, et trois ont survécu difficilement jusqu'au Trias avant de s'éteindre. Unique exemple d'extinction en masse

d'insectes connu aujourd'hui, la crise du Permien a manifestement correspondu à une dévastation de l'environnement.

À quel point la flore terrestre dépérit-elle? On l'ignore, faute de données, mais les feuilles fossiles d'Australie révèlent que de nombreuses plantes ont disparu, et que les types de flores dominant en Australie en ont été modifiés. La disparition de certaines espèces végétales a peut-être également contribué à la disparition des insectes qui s'en nourrissaient.

Les paléobotanistes ont aussi étudié les pollens et les spores. Dans les strates de la fin du Permien, les pol-

lens de gymnospermes (des plantes ligneuses, tels les conifères) sont quasi absents, et, dans les couches suivantes, on ne trouve que des cellules de champignons et quelques déchets organiques. Les cellules de champignons semblent apparaître dans la dernière partie du Permien – dans l'étage changxingien – et atteindre leur apogée à la limite Permo-Trias.

Les responsables de l'extinction

Tous les fossiles marins et terrestres témoignent qu'à la fin du Permien, la vie a été menacée. Pourquoi? Nous n'avons aucune preuve qu'une météorite ait heurté la Terre, comme ce fut peut-être le cas lors de l'extinction des dinosaures. Au milieu des années 1980, des géologues ont cru avoir trouvé d'infimes traces d'iridium (un indice de collision météoritique) à la limite Permo-Trias, dans le Sud de la Chine. Toutefois, personne n'a réussi à confirmer ces affirmations.

De nombreuses autres possibilités se présentent. Tout d'abord, les éruptions volcaniques auraient pu s'intensifier à la fin du Permien. Les trapps sibériens (du mot suédois qui signifie escalier), des empilements de coulées de lave solidifiées, sont un vestige d'une telle activité. Ces escaliers de lave comptent au moins 45 coulées de 400 à 3 700 mètres d'épaisseur. Leur volume est de l'ordre de 1,5 million de kilomètres cubes, et il est peut-être encore supérieur, car ils s'étendent apparemment vers l'Ouest, sous les roches plus récentes des montagnes de l'Oural. Comparée à cette éruption, celle du mont Pinatubo, en 1991, ne fut qu'un souffle léger, crachant des cendres, mais pas de lave, et, en 1783, l'éruption du Laki, en Islande, ne rejeta que 15 kilomètres cubes de lave.

Toutes les laves des trapps sibériens auraient été rejetées en moins de un million d'années, peut-être en 600 000 ans seulement, de la fin du Permien au début du Trias. En outre, leur rejet aurait correspondu à celui des cendres volcaniques trouvées dans le Sud de la Chine.

Une violente activité volcanique aurait-elle pu menacer la vie sur Terre à la fin du Permien? Les éruptions ont divers effets à court terme : un refroidissement dû à la fois aux poussières et aux sulfates éjectés dans la stratosphère, des pluies acides, des

Les extinctions sont-elles périodiques?

Selon la plupart des paléontologues, l'extinction survenue à la limite entre le Permien et le Trias, c'est-à-dire à la limite entre le Paléozoïque (ère primaire) et le Mésozoïque (ère secondaire), est la plus importante de l'histoire biologique de notre planète. Son impact sur l'évolution ultérieure de la biosphère est indéniable et, à ce titre, elle mérite amplement l'intérêt qu'on lui porte. Si beaucoup de spécialistes cherchent à expliquer les extinctions en masse par un événement unique (l'explication la plus fréquente étant la chute d'une météorite), Douglas Erwin montre de façon fort convaincante que la crise Permo-Trias est un phénomène complexe. Chaque élément pris séparément ne peut expliquer l'ampleur de cette crise, malheureux concours de circonstances... surtout pour ceux qui, comme les trilobites, ont disparu à cette époque.

Dès 1977, certains paléontologues ont supposé que le phénomène des grandes extinctions est cyclique, survenant tous les 32 millions d'années. Plus tard, en 1983, la période a été ramenée à 26 millions d'années. Pour expliquer ces crises «à répétition», on a proposé que notre planète était régulièrement bouleversée par des météorites ou par des comètes.

Toutefois, tous les impacts ne sont pas responsables d'extinctions majeures. Un exemple en est le cratère d'impact de la Manicouagan, au Québec. Avec ses 70 kilomètres de diamètre, certains virent en lui la

signature de la météorite responsable de la crise de la fin du Trias, survenue il y a 205 millions d'années. Cependant, il est maintenant établi qu'il a précédé cette crise de près de cinq millions d'années, et qu'il ne saurait en être tenu pour responsable.

Aujourd'hui, si un astéroïde semblable à celui qui a heurté la Terre à la fin du Crétacé entrerait en collision avec notre planète, il provoquerait certainement une crise majeure, non pas uniquement à cause de l'énergie destructrice qu'il transférerait, mais parce qu'il tomberait à un moment où nos écosystèmes sont fragilisés. Nous sortons en effet d'une glaciation, et les provinces biogéographiques actuelles ne sont pas encore stabilisées. À cela vient se greffer les effets désastreux de l'activité humaine sur l'environnement. Il est probable qu'à la fin du Crétacé, les écosystèmes étaient également plus fragiles qu'à la fin du Jurassique, par exemple.

Si les crises semblent être complexes et résulter de l'interaction de plusieurs facteurs, peut-on encore parler de phénomène cyclique? Quelle est la probabilité que différents facteurs se combinent régulièrement pour ébranler tous les écosystèmes de la planète? L'évolution de notre biosphère doit beaucoup au hasard, et chaque crise qui la ponctue est un événement particulier, différent de tous ceux qui l'ont précédée.

Gilles CUNY
Université de Bristol

incendies, la libération de traces d'éléments toxiques et une augmentation du rayonnement ultraviolet par suite d'un amincissement de la couche d'ozone. À plus long terme, le dioxyde de carbone émis, présent dans l'atmosphère, provoque le réchauffement de l'atmosphère.

Toutefois, il semble difficile que le volcanisme ait pu tuer 90 pour cent des espèces marines. En effet, nous avons examiné des cendres volcaniques déposées, au cours des 100 derniers millions d'années, par des éruptions d'une ampleur proche de celles qui ont eu lieu au Sud de la Chine, à la fin du Permien. Nous avons montré que ces événements n'ont pas réduit la diversité des formes de vie locales ou globales, sur terre ou dans les océans.

De surcroît, l'impact environnemental de ces éruptions dépend de plusieurs facteurs. L'estimation des

diverses conséquences d'une éruption qui s'est produite il y a quelque 250 millions d'années (la quantité de sulfate éjectée dans la stratosphère, par exemple) est difficile. Ces éruptions volcaniques n'ont peut-être été qu'un maillon de la chaîne complexe qui a abouti à la crise de la fin du Permien.

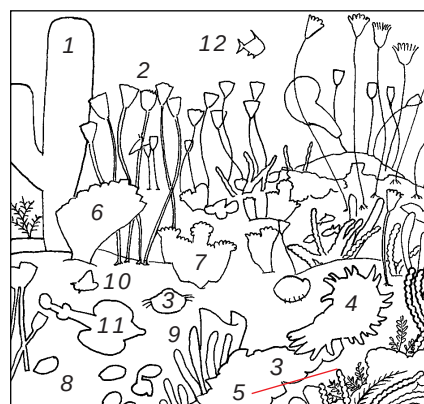
Les clés de la géochimie

La géochimie a récemment apporté son lot d'indices éclairants. Elle a notamment montré que les rapports isotopiques du carbone (le rapport entre les concentrations en isotope 12 et en isotope 13) ont varié à la fin du Permien : une quantité supérieure de matière organique semble avoir été déposée à cette époque.

Que signifie cette accumulation ? On l'ignore, mais elle correspond à une chute du niveau des mers. Au

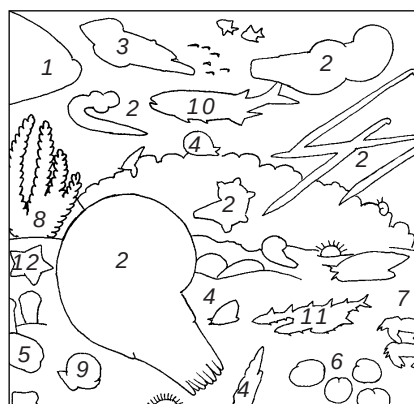
début du Permien, les continents se sont fondus en un unique supercontinent, la Pangée. Autour des plates-formes continentales, les récifs coralliens et diverses communautés des eaux peu profondes étaient florissantes. Puis, vers la fin du Permien, le niveau des mers a baissé, peut-être parce que les modifications de l'écorce terrestre ont élargi les bassins océaniques. La baisse du niveau de la mer perturba l'environnement côtier, en même temps qu'elle découvrait davantage de plaque continentale, ce qui intensifia l'érosion et l'oxydation de la matière organique. Cette oxydation réduisit la concentration atmosphérique en oxygène et augmenta celle du dioxyde de carbone. La planète se réchauffa probablement de près de deux degrés.

D'autres perturbations eurent lieu lorsque le niveau des mers remonta,



PERMIEN

- 1 ÉPONGE
- 2 CRINOÏDE
- 3 BRACHIOPODE
- 4 NAUTOÏDE
- 5 ÉPONGE PERLÉE
- 6 BRYOZOAIRE
- 7 CORAIL
- 8 TRILOBITE
- 9 ALGUE
- 10 ESCARGOT
- 11 POISSON (Janessa)
- 12 POISSON (Dorypterus)



CRÉTACÉ

- 1 CÉLACANTHE
- 2 AMMONOÏDES
- 3 BÉLEMNITES
- 4 ESCARGOT
- 5 BIVALVE
- 6 OURSIN
- 7 CRABE
- 8 ALGUE
- 9 COQUILLE ST. JACQUES
- 10 POISSON (Thriassops)
- 11 POISSON (Davichthys)
- 12 ÉTOILE DE MER

5. LA STRUCTURE DE LA VIE MARINE changea notablement après l'extinction en masse de la fin du Permien. Au milieu du Permien (à gauche), les mers étaient essentiellement peuplées d'animaux immo-

biles ; les poissons et les trilobites y étaient rares. En revanche, dès le Crétacé (à droite), l'océan avait un aspect moderne, avec des organismes mobiles : des bivalves, des gastéropodes et des poissons.



6. CET OURSIN DU PERMIEN, *Miocidarid*, de quatre centimètres de long, est le seul genre d'échinides à avoir survécu à la crise du Permien.

sans doute quelques centaines de milliers d'années plus tard. Les océans engloutirent les habitats côtiers et les îles. De nombreuses communautés côtières périrent sans doute.

La raréfaction de l'oxygène dans l'atmosphère a dû aggraver la situation : la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau de mer aurait diminué, asphyxiant les espèces marines. N'a-t-on pas observé que ce sont plutôt les organismes les plus sensibles à l'anoxie (ou manque d'oxygène) qui ont péri, tandis que les plus résistants ont survécu ?

Ainsi diverses causes ont peut-être contribué à la crise de la fin du Permien. Aucune, à elle seule, n'aurait pu provoquer une extinction de cette envergure, mais, malheureusement pour la faune du Permien, elles se sont alors combinées.

L'extinction se serait produite en trois phases : au cours de la première, le niveau des mers a baissé autour du continent pangéen, si bien que l'habitat a été modifié, que le climat est devenu instable et que de nombreuses espèces spécialisées ont disparu. Puis, lors de cette régression océanique, de violentes éruptions volcaniques ont libéré dans l'atmosphère beaucoup de dioxyde de carbone : l'instabilité climatique s'est renforcée et a fragilisé l'environnement – c'est la deuxième phase. À la fin du Permien et au début du Trias – la troisième phase –, le niveau des mers est

remonté et les continents ont été inondés par de l'eau pauvre en oxygène. Les habitats côtiers ont été détruits et de nombreux groupes qui avaient survécu ont disparu.

La vie après la mort

Les événements qui ont suivi l'extinction sont aussi très intéressants. Après les autres extinctions en masse, la vie a repris le dessus en un million d'années environ, mais, dans le cas de la crise du Permien, cinq millions d'années semblent avoir été nécessaires ! Les communautés biologiques ont été si désorganisées qu'il a fallu plusieurs millions d'années pour qu'elles se reconstruisent et s'épanouissent. Toutefois, la récupération paraît peut-être plus longue qu'elle ne l'a réellement été, en raison d'une mauvaise conservation des fossiles.

Quelle qu'ait été la durée nécessaire à son rétablissement, la vie sur terre a notablement changé. Nous l'avons indiqué, les animaux immobiles (brachiopodes, bryozoaires et échinodermes) ont prédominé dans les mers permienues. Les animaux mobiles – poissons, bivalves, céphalopodes (la famille des calmars) et gastéropodes (les escargots) – ne représentaient qu'une faible proportion de la communauté.

Peu après l'extinction, pendant le Trias inférieur, les quelques espèces qui avaient survécu abondèrent :

palourdes, ammonoïdes, gastéropodes... *Lystrosaurus*, un ancêtre des mammifères proche des reptiles, était le vertébré le plus commun sur toute la Pangée. La palourde *Claraia* abondait dans les océans. Vers le milieu du Trias, quelque 25 millions d'années plus tard, les oursins et d'autres groupes ne vivant que dans des environnements favorables commencèrent à réapparaître, sans doute parce qu'ils retrouvaient des conditions marines plus normales. Ces «groupes Lazare», ressuscités du royaume des morts, commencèrent à remplacer les faunes survivantes.

Les océans ressemblaient alors à ceux d'aujourd'hui : les créatures les plus mobiles, tels les bivalves, les gastéropodes et les crabes, dominaient. Les céphalopodes et les prédateurs capables de nager se diversifièrent. Des organismes se mirent à s'ensabler, afin de se protéger des prédateurs. Une course évolutive s'amorça entre les prédateurs et leurs proies, modifiant l'architecture squelettique au cours du Mésozoïque et produisant une faune plus charnue que celle du Paléozoïque. Des écosystèmes plus élaborés sont apparus : la nourriture était plus abondante et plus variée.

Les changements évolutifs qui ont eu lieu sur la terre ferme sont moins bien connus, parce que les fossiles n'ont pas encore été étudiés systématiquement. Plusieurs groupes de reptiles et d'amphibiens s'éteignirent. Les insectes évoluèrent, du type libellule, dont des ailes sont figées en position de vol et ne peuvent être repliées le long du corps, vers des formes capables de replier les ailes. Ces nouvelles formes, qui représentent 98 pour cent des insectes actuels, avaient des stades larvaire et adulte différenciés, adaptations permettant la colonisation de nouveaux habitats et la résistance aux variations climatiques.

Les espèces qui échappèrent à la crise du Permien étaient-elles dotées d'adaptations qui ont assuré leur survie ou n'ont-elles survécu que par hasard ? De nombreux fossiles de la palourde *Claraia* sont emprisonnés dans des roches qui témoignent de conditions anoxiques. La quantité et l'omniprésence de *Claraia* montrent que cette espèce résistait aux faibles concentrations en oxygène. D'autre part, *Miocidarid*, le seul survivant apparent des échinides (les oursins), n'a que deux colonnes de plaques

interambulacraires (les zones entre les «pétales» de la coquille d'un oursin) ; d'autres échinides du Permien avaient entre une et huit colonnes de plaques. Comme *Miocidaris* fut le seul genre à survivre, les échinides évoluèrent des formes ayant un nombre variable de plaques à celles qui n'en avaient que deux. Selon certains paléontologues, le squelette d'un échinide est plus solide quand il est composé de deux colonnes de plaques ; il aurait ainsi été mieux adapté pour résister aux prédateurs du monde postpermien.

Toutefois ces observations n'indiquent pas si la crise de la fin du Permien a ou non sélectionné certaines caractéristiques. Tous les échinides auraient-ils des plaques à deux colonnes même si l'extinction de la fin du Permien n'avait pas eu lieu ? La faune survivante est-elle constituée des groupes qui étaient les plus abondants et les plus répandus avant l'extinction, et qui avaient, par conséquent, le plus de chances de survivre ? On l'ignore.

En revanche, on sait que l'extinction en masse de la fin du Permien a eu, sur l'histoire de la vie, des conséquences supérieures à tout autre événement survenu après l'apparition des animaux complexes. Sans cette extinction, la composition du milieu littoral serait très différente. À l'école, les enfants apprendraient ce que sont les crinoïdes et les brachiopodes, et non les étoiles de mer ni les oursins. Sur la plage, ils pêcheraient les trilobites piégés, par la marée descendante, dans des flaques.

Douglas ERWIN est conservateur dans le Département de paléobiologie du Musée américain d'histoire naturelle de l'Institut Smithsonian.

David M. RAUP, *Extinction : Bad Genes or Bad Luck?*, W.W. Norton, 1991.

Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys : Stratigraphy, Classification and Relations with the Western Tethys, sous la direction de Walter C. Sweet, Yang Zunyi, J.M. Dickins et Yin Hongfu, Cambridge University Press, 1992.

Douglas H. ERWIN, *The Great Paleozoic Crisis : Life and Death in the Permian*, Columbia University Press, 1993.

Douglas H. ERWIN, *The Permo-Triassic Extinction*, in *Nature*, vol. 367, pp. 231-236, 20 janvier 1994.

Les capteurs du mouvement

SASHA ZILL • ERNST-AUGUST SEYFARTH

Grâce à des capteurs qui mesurent les contraintes, les blattes, les crabes et les araignées coordonnent leurs mouvements. Leurs modes de locomotion inspirent les constructeurs de robots.

Une araignée avance lentement vers une mouche prise dans sa toile ; un crabe progresse latéralement, luttant contre le ressac ; une blatte se faufile dans une fissure pour s'abriter de la lumière. Les trois animaux ont un point commun : ils se déplacent en se fondant sur les informations enregistrées par les capteurs de force de leur exosquelette, l'enveloppe rigide qui les protège (chez ces animaux, le squelette est à l'extérieur). Sur les pattes de ces arthropodes, ces organes détectent les moindres déformations de l'exosquelette ; ils fonctionnent comme des jauges de contrainte, qui mesurent le rapport entre la variation de longueur d'un objet et sa longueur d'origine.

Depuis plusieurs dizaines d'années, les ingénieurs utilisent aussi de tels capteurs : les jauges de contrainte sont des lames métalliques ou semi-conductrices souples, dont la résistance électrique varie avec la contrainte subie. L'appareil le plus courant qui en utilise est sans doute le pèse-personne électronique. Lorsque nous montons sur la balance, nous déformons un fléau mécanique ; une jauge de contrainte,

qui en est solidaire, transforme la déviation du fléau en un signal électrique, traduit à l'affichage en une valeur de poids. D'autres jauges surveillent la déformation des ponts, des bâtiments, des automobiles ou des avions.

Ces questions intéressent les spécialistes de robotique, qui construisent des machines qui marchent. De telles machines serviraient dans les environnements où les systèmes roulants sont inutilisables, sur la Terre ou sur d'autres planètes. Toutefois, elles n'ont pas encore satisfait pleinement leurs concepteurs : le robot *Dante*, de la NASA, un mécanisme à huit pattes articulées que l'on avait envoyé dans des cratères de volcans en Antarctique et en Alaska, avait été endommagé quand il s'était renversé. De surcroît, *Dante* était maladroit : la compréhension des jauges de contrainte des arthropodes permettrait une meilleure coordination de ses pattes.

Les jauges modernes font pâle figure devant les capteurs des arthropodes, qui assurent une double fonction de mesure et de commande dans la coordination des pattes : les jauges de contrainte de certains animaux leur permettent même de mémoriser des itinéraires. Comment ces organes fonctionnent-ils ? Quelles sont leurs relations avec le système nerveux central ?

Des canaux sensibles

Chacun des trois principaux groupes d'arthropodes, les insectes, les arachnides et les crustacés, possède des organes spécifiques, qui détectent les contraintes exercées sur l'exosquelette. Chez les insectes, cet organe est la sensille campaniforme, ainsi nommée à cause de sa forme en cloche (en latin, *campana* signifie cloche). Chez les araignées, l'organe correspondant est une sensille en forme de fente : un étroit canal traverse la cuticule, le tissu rigide de l'exosquelette, et aboutit, sur la face externe, à une mince membrane. Les organes sensibles aux forces des crabes ressemblent à des canaux dont l'extrémité est juste au-dessous de la surface de l'exosquelette (voir la figure 2).

Malgré des différences de détail, ces trois types d'organes sensoriels communiquent de façon similaire avec le système nerveux central. Chacun d'eux est relié à un neurone, sous l'exosquelette. Lorsqu'une contrainte déforme l'exosquelette aux alentours d'une sensille, l'extrémité du neurone à laquelle celle-ci est attachée se

1. LA BLATTE *Periplaneta americana* (à gauche) et l'araignée tropicale *Cupiennius salei* (à droite) coordonnent les mouvements de leurs pattes grâce à des capteurs qui fonctionnent comme des jauges de contrainte.

