

La génomique au Genopole

La France participe à l'effort mondial de séquençage du génome humain de diverses façons et notamment par la création du Genopole, à Évry, dont l'ambition est de regrouper des centres nationaux, des laboratoires de recherche fondamentale et un ensemble d'entreprises de biotechnologies, indispensables au transfert des découvertes des laboratoires de recherche publics ou privés vers l'industrie.

Demain, ces activités auront des retombées dans la plupart des domaines de recherche en biologie, en médecine (pour le diagnostic et les traitements) et dans de nombreux secteurs industriels, notamment la pharmacie, l'agroalimentaire, les industries de l'environnement, ou encore la chimie lourde et, peut-être, l'informatique.

Aujourd'hui, sont réunis à Évry un laboratoire national de séquençage, le Genoscope, qui participe aux programmes internationaux de séquençage, qui a ses propres projets et qui répond aux besoins en séquençage de la communauté scientifique nationale publique et privée ; le Centre national de génotypage qui a pour mission de rechercher des gènes de susceptibilité à diverses maladies et d'étudier les relations entre le patrimoine génétique de l'homme et ses manifestations individuelles.

À côté de ces deux centres, qui fonctionnent grâce aux fonds publics, se trouvent le laboratoire Généthron de l'Association française contre les myopathies, qui se consacre presque exclu-

sivement à la thérapie génique, un ensemble de laboratoires du CEA, du CNRS, de l'INSERM, de l'INRA, de l'Université Paris VII et des laboratoires de recherche privés. Citons enfin l'installation prochaine de plusieurs structures de bio-informatique, dont le centre national Infobiogen. La plupart de ces laboratoires sont étroitement associés à l'Université d'Évry-Val d'Essonne qui met progressivement en place des enseignements de premier, deuxième et troisième cycles dans ces domaines.

Genopole dispose de moyens de l'État, des collectivités territoriales (Conseil général et Conseil régional), du SAN (le syndicat d'agglomération nouvelle) et de l'Association française contre les myopathies. Une équipe est en charge de la politique de recherche, une autre de la politique de développement industriel (implantation et création d'entreprises de haute technologie en biologie), une troisième de la communication.

La biotechnopôle d'Évry regroupe déjà 15 laboratoires de recherche et 25 entreprises ou projets d'entreprises, dont 15 sont en cours de création. À la fin de l'année 2001, le campus d'Évry devrait regrouper entre 20 et 30 laboratoires de recherche et 50 à 60 entreprises de biotechnologies. Ainsi, Genopole se caractérise par la volonté d'associer des compétences scientifiques et industrielles dans le respect des droits et des devoirs de chacun.

Pierre TAMBOURIN,
Directeur de Genopole®

transmis, directement des parents à leur descendance, avec un taux de mutations assez stable pour jouer le rôle de repère temporel. Parfois des transferts de gènes entre espèces aboutissent à d'importants bonds évolutifs, comme dans le cas des organites qui produisent l'énergie dans les cellules animales (les mitochondries) et dans les cellules végétales (les chloroplastes) : ces constituants cellulaires contiennent leur propre matériel génétique et proviennent de bactéries qui ont été «avalées» par des cellules eucaryotes.

Ce type de «transfert génique horizontal» semble avoir été assez fréquent dans l'histoire de la vie, de sorte que la comparaison des gènes entre les espèces n'aboutira pas à un arbre phylogénétique unique et universel. Comme

l'histoire de l'espèce humaine, l'histoire de la vie serait plutôt comparable à un treillis, où des ramifications s'éloignent, se rapprochent et fusionnent avant de se séparer à nouveau.

Dans 50 ans, le livre de l'histoire de la vie sera plus complet, même si l'énigme de l'apparition du premier organisme capable de se reproduire n'a pas encore été résolue. Nous saurons, par exemple, quand et comment différentes lignées se sont formées, ont adopté ou adapté des gènes, se dotant de nouvelles voies métaboliques ou de nouvelles organisations corporelles. L'observation de la vie à l'échelle du gène sera si familière aux biologistes qu'ils ne parleront plus d'organismes ou d'espèces, mais de gènes. Ils auront identifié les gènes qui ont été trans-

mis ensemble, sur quelles périodes, et dans quels génomes. On aura alors peut-être la réponse à la question posée par Charles Darwin, restée aujourd'hui, sans réponse : qu'est-ce qui distingue l'homme des autres espèces ?

D'autres questions apparaîtront certainement. Comme dans tout domaine scientifique fécond, de nouvelles hypothèses, fondées sur les données recueillies, seront postulées. Paradoxalement, malgré son importance croissante, la génomique, en tant qu'entité bien définie, sera peut-être un peu occultée, car elle aura diffusé dans tous les domaines de la biologie ; elle sera peut-être absorbée par la médecine.

Comment la société réagira-t-elle à cette explosion des connaissances génétiques ? Cette question n'a pas aujourd'hui de réponse simple. Avec les progrès de la génétique et de la technique, on devrait soigner mieux diverses maladies et soulager nombre de souffrances. Toutefois, le progrès s'accompagne de risques : ainsi, certains fanatiques utilisent, aujourd'hui, des arguments génétiques pour tenter de justifier l'existence de groupes raciaux et ethniques. On peut craindre que certains employeurs ou assureurs n'utilisent les informations génétiques pour refuser un emploi ou une assurance. Saurons-nous maîtriser le pouvoir que peut conférer la mise à disposition de l'information génétique ? La question reste ouverte.

Nous espérons que la génétique sera utile dans de nombreux domaines, mais nous craignons que les tensions ne s'accroissent entre les partisans du progrès scientifique et les adeptes d'un retour à une vie plus «naturelle». Les sociétés devront veiller à ce que la génomique soit bien acceptée par la collectivité et à ce que les progrès liés à cette discipline ne soient pas utilisés à des fins pernicieuses.

Francis COLLINS dirige l'Institut de recherche américain sur le génome humain (NHGRI), où Karin JEGALIAN est journaliste scientifique.

Thomas D. GELEHRTER, Francis S. COLLINS et David GINSBURG, *Principles of Medical Genetics*, deuxième édition, Williams and Wilkins, 1998.

Francis S. COLLINS, *Shattuck Lecture – Medical and Societal Consequences of the Human Genome Project*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 341, n° 1, pp. 28-37, 1^{er} juillet 1999.

Que nous apprendront les fossiles?

ÉRIC BUFFETAUT

Les prochaines avancées en paléontologie dépendront de la découverte de nouveaux fossiles. Ces découvertes seront plus clairement interprétées dans le cadre des grands événements qui ont marqué l'histoire de la Terre.

En paléontologie, la prospective est un exercice difficile, parce qu'elle dépend de la prospection... : le progrès paléontologique et la percée conceptuelle sont tributaires du hasard des découvertes. Ainsi notre vision moderne de l'apparition des oiseaux est-elle née de la découverte de la première (?) plume fossilisée. Or la conservation d'un organisme à l'état de fossile est déjà un petit miracle, et la mise au jour du fossile par l'érosion naturelle ou par l'activité humaine est aléatoire. La paléontologie est une science de terrain, une science naturaliste, ce que les représentants d'autres disciplines plus théoriques ont parfois du mal à apprécier.

Si il est difficile de prévoir quels seront les grands progrès de la paléontologie, il est en revanche aisé de prédire que les découvertes de nouveaux fossiles constitueront, comme elles l'ont toujours fait, un apport essentiel au développement de la discipline. Mais c'est aussi par des approches nouvelles, liées à des conceptions originales de l'évolution de la Terre et des êtres vivants qui la peuplent, que la paléontologie de demain elle-même évoluera.

La paléontologie se laisse malaisément programmer, car la découverte inattendue est souvent celle qui fait réellement progresser la connaissance. Devrions-nous alors prospecter prioritairement des régions encore mal connues, où les chances de rencontrer des fossiles inconnus sont plus grandes? Certainement, mais dans une certaine mesure seulement. Si les parties du monde qui ont encore été relativement peu explorées paléontologique-

ment, comme l'Antarctique, réservent des surprises intéressantes, des exemples récents montrent que des contrées supposées bien connues, parce que nous les exploitons depuis longtemps, livrent parfois des fossiles tout à fait inattendus.

Un bon exemple est celui de *Baryonyx walkeri*, un grand dinosaure apparemment piscivore d'un type nouveau, découvert en 1983 dans une carrière des environs de Londres. Cet animal a modifié nombre de nos conceptions sur les dinosaures théropodes ; pourtant il provient de couches géologiques qui livrent des restes de dinosaures depuis le début du XIX^e siècle, et où l'on aurait pu croire qu'il n'y avait plus grand-chose de nouveau à trouver. Un autre exemple est celui de *Gargantuavis philoinos*, un oiseau géant incapable de voler, récemment trouvé dans le Crétacé supérieur du Sud de la France, où l'on avait précédemment trouvé en quantité des os de dinosaures, sans que rien puisse faire supposer l'existence de tels oiseaux, jusque-là insoupçonnés au Crétacé. On peut aussi noter que les premiers restes de *Baryonyx*, tout comme ceux de *Gargantuavis*, furent découverts par des paléontologues amateurs. Lorsque ceux-ci collaborent avec les professionnels, leur contribution aux progrès de la paléontologie est importante. Nul doute que, dans le futur, certaines découvertes d'un grand intérêt seront dues à des amateurs.

Sachant que l'inattendu se trouve parfois à notre porte, peut-on néanmoins prédire que certains types de fossiles non encore connus seront un jour découverts? Ce que nous savons

de l'évolution des êtres vivants peut nous guider. Il ne s'agit pas là de retourner aux conceptions dépassées du début du XX^e siècle, quand certains croyaient avoir découvert des «lois de l'évolution» qui se révélèrent n'être, au mieux, que de vagues règles empiriques. Les tentatives plus récentes dans cette direction, même lorsqu'elles prétendent s'appuyer sur des méthodes modernes (les fractales, par exemple), ne sont pas plus convaincantes, et leurs résultats n'ont rien apporté de convaincant ni de constructif à la connaissance du déroulement ou des processus de l'évolution. Peut-on néanmoins espérer trouver «les fossiles au rendez-vous du calcul», comme le disait le paléontologue Pierre de Saint-Seine dans les années 1950? Le mot «calcul» n'est sans doute pas le plus approprié, mais il est sans doute possible de faire des déductions à partir de ce que nous savons de l'histoire évolutive de certains groupes d'organismes.

La prévision, parfois facile...

La prédiction est parfois facile. Ainsi l'actuel cœlacanthe, *Latimeria*, d'abord trouvé dans l'océan Indien au large de l'Afrique du Sud et des Comores, puis beaucoup plus récemment dans les eaux indonésiennes, est un représentant d'un groupe de poissons que l'on a longtemps cru éteint – d'où les innombrables considérations sur la nature de «fossile vivant» du cœlacanthe. Un des nombreux points intéressants de cette histoire, c'est que les plus récents fossiles connus de cœlacanthes, qui ressemblent

à la forme actuelle, ont été trouvés dans des roches datant du Crétacé supérieur, ce qui signifie qu'il existe une lacune temporelle de quelque 80 millions d'années entre ces fossiles et l'actuel *Latimeria*. Comme il est évident que des cœlacanthes ont existé pendant toute cette période, qui couvre la fin du Crétacé et tout le Cénozoïque, on peut s'attendre à ce que des fossiles de cœlacanthes soient un jour trouvés dans des roches du Crétacé terminal, ou de quelque étage du Tertiaire. Cela ne manquera pas de faire quelque bruit dans les milieux paléontologiques, mais la découverte est tout à fait prévisible.

La recherche des origines

La connaissance que nous avons acquise, au bout de deux cents ans de recherche paléontologique, de l'histoire des êtres vivants à travers les temps géologiques autorise bien des suppositions sur les découvertes à venir. Certains groupes

d'animaux ou de plantes «apparaissent» dans les couches géologiques d'une façon abrupte, avec des formes relativement évoluées, ce qui suggère que des représentants plus anciens et plus primitifs devraient être découverts. Les débuts de beaucoup de groupes de dinosaures sont ainsi encore mal connus. Les sauropodes, par exemple, font leur apparition dans le registre paléontologique au début du Jurassique, mais tout porte à croire qu'ils étaient déjà présents au Trias, et que leurs restes seront tôt ou tard trouvés dans des roches de cette période.

La recherche des plus anciens représentants des groupes les plus variés d'organismes est une préoccupation essentielle des paléontologues. La découverte toute récente des plus anciens poissons connus, dans le Cambrien de Chine, illustre de façon spectaculaire les résultats qu'on peut attendre de telles recherches. Cette quête des origines s'étend évidemment

au monde vivant dans son ensemble. La recherche du premier être vivant, en pratique, a bien sûr fort peu de chances d'aboutir un jour, mais l'étude des très anciennes traces de vie, qu'il s'agisse d'ailleurs de véritables fossiles ou d'indices chimiques d'une activité biologique dans de très vieilles roches précambriennes, est un domaine de recherche très actif, où des découvertes importantes sont à attendre.

Le futur de la filiation

Les arbres de parenté, actuellement établis grâce aux méthodes de la systématique phylogénétique, ou cladisme, autorisent aussi certaines prédictions. Bien avant l'avènement du cladisme, d'ailleurs, certains paléontologues ne s'étaient pas privés de spéculer sur la découverte prévisible de «chaînon manquant» entre groupes d'organismes. Dès l'acceptation de l'évolutionnisme par la communauté paléontologique



1. LA CHINE AU CRÉTACÉ INFÉRIEUR (il y a environ 120 millions d'années) : un groupe de *Beipiaosaurus* (dinosaures thérozinosauroides) sème la panique parmi divers autres animaux emplumés : à droite, le dinosaure théropode *Caudipteryx* ; à gauche, les dinosaures *Sinosauropteryx* (compsognathidés) et *Sinornithosaurus* (dromaeosauridés). Dans les branches, de vrais oiseaux (*Confuciusornis*). Cette reconsti-

tution de Luis Rey est fondée sur des spécimens récemment découverts dans le nord-est de la Chine. Ces fossiles remarquablement conservés montrent des traces de revêtements épidermiques, plumes ou filaments, qui conduisent à modifier profondément l'image que l'on se faisait de certains dinosaures – et qui confirment les prédictions faites par certains paléontologues depuis une vingtaine d'années.

durant les dernières décennies du XIX^e siècle, les réflexions sur ce thème ne manquèrent pas, avec parfois des résultats concrets spectaculaires. On connaît l'exemple du médecin et anatomiste néerlandais Eugène Dubois, que des considérations théoriques sur l'évolution humaine conduisirent à Java pour y trouver le « chaînon manquant » entre l'homme et le singe : il y découvrit les restes du *Pithecanthropus*, aujourd'hui considéré comme un humain archaïque, *Homo erectus*.

La paléontologie actuelle s'est quelque peu détournée de la quête des chaînons manquants, mais la recherche des « groupes-frères » a en grande partie remplacé cette dernière. La recherche du groupe-frère des oiseaux, par exemple, occupe actuellement bon nombre de paléontologues, stimulés par la découverte récente de divers petits dinosaures carnivores présentant des caractères aviens, et d'oiseaux primitifs aux caractères dinosauriens. C'est un domaine où l'on peut prédire sans grand risque d'erreur que des découvertes importantes sont à attendre. D'ores et déjà, des fossiles déterminants à cet égard se sont trouvés au rendez-vous du « calcul », ou plutôt de la spéculation intellectuelle.

La paléobiologie

Les réflexions dépassent d'ailleurs le domaine de la phylogénie pour s'étendre à celui de la paléobiologie. Dès les années 1980, le paléontologue et artiste américain Gregory Paul avait supposé l'existence de plumes chez certains dinosaures, et réalisé des reconstitutions de théropodes emplumés. Cette conception était fondée en grande partie sur l'idée de liens phylogénétiques étroits entre ces dinosaures et les oiseaux : G. Paul, en 1987, trouvait « difficile de concevoir que les petits théropodes, très proches d'*Archaeopteryx*, n'aient pas été emplumés comme leurs descendants aviens ». De plus, dans l'hypothèse où ces dinosaures avaient pu être homéo-

thermes (« à sang chaud »), un revêtement épidermique de type plume paraissait probable. Les dinosaures couverts de plumes dessinés par G. Paul et certains autres artistes paraissaient hautement spéculatifs jusqu'à la découverte, à partir de 1996, de fossiles remarquablement conservés dans le Crétacé supérieur du nord-est de la Chine. Nombre d'entre eux montrent, outre le squelette, les restes de parties « molles » qui ne sont qu'exceptionnellement conservées à l'état fossile. Ils révèlent que beaucoup de dinosaures théropodes étaient couverts de filaments, pas à proprement parler des plumes, mais une sorte de duvet. Ce revêtement épidermique a été observé chez des représentants des compsognathidés, des dromaeosauridés et des thérazinosaures. Qui plus est, deux petits théropodes montrant de vraies plumes mais incapables de voler, *Protarchaeopteryx* et *Caudipteryx*, ont aussi été décrits (certains auteurs, il est vrai, y verraient plutôt des oiseaux primitifs ayant perdu l'aptitude au vol). Les reconstitutions les plus récentes montrent le monde des dinosaures, duvetés ou emplumés, sous un jour nouveau, mais assez conforme aux prédictions de G. Paul.

On pourrait aussi rappeler comment la découverte de nombreuses pistes de ptérosaures à Crayssac (Lot) par Jean-Michel Mazin et son équipe a brillamment confirmé les suppositions de divers paléontologues, au pre-

mier rang desquels Peter Wellnhofer : ces reptiles volants avançaient à quatre pattes. Ces prédictions se sont « réalisées » grâce à la découverte de nouveaux gisements contenant des fossiles extraordinairement bien conservés, révélant des détails anatomiques rarement préservés.

Impasses et espoirs déçus

Dans le domaine d'une science du passé comme la paléontologie, on peut donc parfois prévoir l'avenir. Qu'en est-il maintenant du développement futur de la discipline, considéré dans une optique plus vaste ? Quelles sont les directions de recherche, les approches qui devraient conduire à des avancées intéressantes ? Il faut à cet égard être prudent et se garder de certains enthousiasmes prématurés. Au début des années 1990, certains paléontologues plaçaient beaucoup d'espoir dans la recherche de biomolécules fossiles, en particulier d'ADN. Le succès du film *Jurassic Park* a contribué à populariser cette approche, et l'idée de reconstituer le code génétique d'organismes disparus, voire de les recréer, a excité les imaginations. L'annonce de la découverte par une équipe américaine de restes d'ADN dans des insectes fossiles conservés dans l'ambre donnait corps à ces espoirs, même si, pour les paléontologues, la recréation de dinosaures relevait de la science-fiction. Les espoirs sont retombés, depuis que

les tentatives pour répéter cette extraction d'ADN fossile, menées notamment en Angleterre, se sont toutes révélées vaines : la molécule d'ADN est trop fragile pour résister longtemps aux modifications chimiques liées à la fossilisation, et il paraît vraisemblable que des contaminations sont à l'origine des « découvertes » signalées dans les insectes de l'ambre. Une approche très prometteuse s'est transformée en déception. Cela ne signifie pas que l'approche biochimique de l'étude des fossiles soit nécessairement vouée à l'échec. L'étude des isotopes de certains éléments (notamment le



2. FÉMUR (à gauche) et ensemble sacrum-bassin (à droite) de *Gargantuavis philoinos*, oiseau géant, incapable de voler, provenant du Crétacé supérieur du Languedoc. Les premiers restes de cet oiseau, de la taille probable d'une autruche, ont été découverts en 1995 en Provence. On ignorait auparavant qu'il eût existé de tels oiseaux terrestres de grande taille au temps des dinosaures. La découverte de *Gargantuavis* dans le Crétacé supérieur du sud de la France, où l'on récolte des vertébrés fossiles depuis plus de 150 ans, illustre bien la possibilité de trouver des fossiles totalement insoupçonnés dans des lieux qui peuvent paraître à tort bien connus paléontologiquement. La recherche paléontologique réserve sans nul doute encore beaucoup de surprises de ce type.



3. DÉGAGEMENT DES VERTÈBRES de la queue de *Siamotyrannus isanensis*, le plus ancien tyrannosaure connu, dans le Crétacé inférieur du nord-est de la Thaïlande. La découverte de ce spécimen a fait reculer d'au moins vingt millions d'années dans le passé l'ancienneté de la famille des *Tyrannosauridae*. Elle est le résultat d'un programme



Eric Buffetaut

de recherches à long terme sur les dinosaures de Thaïlande, soutenu par le Service géologique de Thaïlande et le CNRS. La recherche sur le terrain est l'un des moteurs essentiels du progrès des connaissances en paléontologie, et l'on peut sans nul doute en attendre des découvertes majeures dans le futur.

carbone et l'azote) dans le collagène conservé par certains fossiles a ainsi pu donner des résultats intéressants sur le régime alimentaire d'animaux disparus, tels l'ours des cavernes ou le mammoth. Cependant, les résultats significatifs obtenus jusqu'ici portent essentiellement sur des animaux relativement peu anciens à l'échelle géologique, dont les fossiles ont pu conserver en relativement bon état des molécules qui résistent apparemment mal aux phénomènes de la fossilisation.

La mauvaise conservation à long terme de ces molécules organiques pourrait imposer une limite difficile à franchir à beaucoup d'approches biochimiques, même si les découvertes épisodiques de spécimens très bien conservés, qu'il s'agisse de mammoths congelés ou d'insectes ou de lézards inclus dans de l'ambre, font resurgir périodiquement des espoirs que les médias font facilement passer dans le domaine de la science-fiction. Au demeurant, une meilleure connaissance des espèces fossiles en tant qu'êtres qui

furent vivants ne passe pas nécessairement par des techniques particulièrement nouvelles ou élaborées : la découverte dans le désert de Gobi de squelettes du dinosaure *Oviraptor* en position de couvaison sur ses œufs nous a appris beaucoup plus sur la reproduction des dinosaures que toutes les études biogéochimiques réalisées sur les œufs de dinosaures depuis une quinzaine d'années... Quoi qu'il en soit, l'intérêt pour la biologie, la physiologie et le comportement des espèces disparues, aussi vieux que la paléontologie elle-même, est particulièrement fort actuellement, et il ne fait guère de doute que les reconstitutions paléobiologiques, appuyées sur des techniques nouvelles ou sur des fossiles remarquables, ont un grand avenir.

C'est probablement au niveau des grandes tendances que l'on peut tenter une certaine prospective en paléontologie. Depuis les débuts de cette discipline scientifique, la première tâche des paléontologues a été d'établir l'inventaire des espèces

fossiles d'animaux et de végétaux. Cette tâche est loin d'être achevée, comme l'indique le rythme de description de nouvelles espèces fossiles appartenant à tous les groupes zoologiques et botaniques. Mais cet inventaire ne prend tout son intérêt que lorsqu'il est interprété.

Datation et interprétation

Aux débuts de la paléontologie scientifique, durant les premières décennies du XIX^e siècle, un des premiers soucis fut d'ordonner les fossiles suivant leur distribution dans les couches géologiques. Cette approche stratigraphique de la paléontologie a perduré, notamment à cause de son application à la datation relative des roches, et ses progrès futurs seront sans doute un affinement grandissant de la résolution fournie par les datations biostratigraphiques.

Avec le triomphe de l'évolutionnisme dans les décennies suivant la parution de l'*Origine des espèces* de Darwin

PÉRIODE	DATE (MA)	ÉVÈNEMENTS MAJEURS	PRINCIPALES VICTIMES
NÉOGÈNE		ÉVOLUTION HUMAINE	Plancton, invertébrés marins
	24		
PALÉOGÈNE			Plancton, mammifères Plancton, invertébrés marins, mammifères
	65	LES PLANTES À FLEURS DEVIENNENT PRÉDOMINANTES SUR TERRE	Plancton, invertébrés et reptiles marins, dinosaures Invertébrés marins
CRÉTACÉ			
	144	ÉVOLUTION DES PREMIERS OISEAUX	Plancton, invertébrés marins, reptiles marins, dinosaures.
JURASSIQUE			
	213		Invertébrés marins
TRIAS		ÉVOLUTION DES PREMIERS MAMMIFÈRES	Invertébrés marins
	248		Protozoaires, invertébrés marins, reptiles mammaliens
PERMIEN			
	286		
CARBONIFÈRE		ÉVOLUTION DES PREMIERS REPTILES	
	320		
	360	INVASION DES TERRES PAR LES VERTÉBRÉS	
DÉVONIEN			
	408	EXPLOSION DES PLANTES TERRESTRES	Plancton, invertébrés marins, poissons primitifs
SILURIEN			
	438		Invertébrés marins, dont les bâtisseurs de coraux
ORDOVICIEN			
	505	ÉVOLUTION DES POISSONS	Invertébrés marins (trilobites)
CAMBRIEN			
	590	DIVERSIFICATION DE LA VIE MARINE	
PRÉCAMBRIEN			
	650		

4. LES GRANDES EXTINCTIONS, (en rouge), ont ponctué l'histoire des êtres vivants, éliminant certaines espèces et permettant l'explosion évolutive d'autres lignées. Ces extinctions sont liées à des crises de l'environnement terrestre dont les causes seront précisées par des recherches sur les fossiles et sur la dynamique du Système solaire.

en 1859, les fossiles acquièrent rapidement le statut de témoins privilégiés de l'évolution. Ce fut la grande époque de la recherche des chaînons manquants, mais aussi celle de la recherche de «lois» de l'évolution, que l'on espérait découvrir par l'étude des données paléontologiques. Cette recherche de lois s'est révélée assez vaine, et les rares tentatives récentes dans ce sens paraissent tout aussi vouées à l'échec. Depuis l'avènement de la théorie synthétique, ou néo-darwinienne, de l'évolution, qui a intégré notamment les données fondamentales de la génétique, qu'ignorait Darwin, il est apparu que ce n'est pas la paléontologie qui peut nous renseigner le plus utilement sur les *mécanismes* de l'évolution (qui relèvent beaucoup plus de la génétique et de la biologie moléculaire), alors qu'elle reste une source d'information absolument irremplaçable sur son *déroulement*. Cela a conduit à souligner de nouveau le caractère de science historique de la paléontologie. Dans la seconde moitié du XX^e siècle, on a assisté à un change-

ment d'approche très net dans le domaine de la paléontologie historique. L'accent fut longtemps mis sur l'analyse, fondée sur des études anatomiques détaillées, des grandes transitions évolutives, par exemple, dans le domaine de la paléontologie des vertébrés, le passage des poissons aux amphibiens, puis des amphibiens aux reptiles, des reptiles aux mammifères, etc. Plus récemment, la reconstitution des relations de parenté entre les organismes a pris le dessus, du fait du développement de l'approche cladiste, la recherche des ancêtres étant remplacée par celle des groupes-frères. Le changement méthodologique a été important, mais a parfois relégué au second plan l'approche historique. Un cladogramme veut exprimer des relations de parenté, mais il ne devient une représentation de l'histoire évolutive d'un groupe d'animaux ou de plantes que lorsqu'un stade suivant est franchi et qu'il est «calibré», replacé dans une succession stratigraphique.

Pour envisager ce que pourrait être la paléontologie du futur, il faut sans

doute s'intéresser à des changements d'approche plus récents encore. L'un des plus importants est sans doute la redécouverte du phénomène d'extinction. La paléontologie scientifique est née, à la fin du XVIII^e siècle, avec la découverte de ce phénomène, lorsqu'il a été démontré de façon irréfutable, par Georges Cuvier notamment, que d'innombrables espèces animales et végétales n'avaient plus de représentants actuels, et qu'elles avaient donc disparu. La paléontologie naissante acquerrait ainsi son objet d'étude, les espèces qui n'existent plus de nos jours. Mais le phénomène d'extinction lui-même parut à beaucoup perdre de son intérêt dès lors que les catastrophes furent bannies de l'histoire de la Terre par une géologie systématiquement actualiste et gradualiste, et que la théorie de l'évolution permit de concevoir que beaucoup d'espèces avaient en fait disparu par transformation en d'autres espèces. Dans un tel cadre conceptuel, les extinctions n'apparaissaient plus que comme un phénomène secondaire, voire anecdotique, et, depuis le milieu du XIX^e siècle jusqu'à la fin du XX^e, ce sont l'origine et la transformation des espèces qui ont mobilisé les énergies des paléontologues, bien plus que leur extinction.

Les extinctions, problème majeur

Les choses ont changé depuis 1980, avec l'arrivée sur le devant de la scène d'un nouveau catastrophisme, bien sûr complètement débarrassé des arrière-pensées religieuses qui avaient coloré certaines des conceptions catastrophistes (mais pas toutes) au XIX^e siècle. Les catastrophes étudiées par la géologie moderne n'ont plus rien de surnaturel, qu'il s'agisse d'impacts d'objets extraterrestres ou d'éruptions volcaniques massives. L'étude des extinctions connaît depuis lors un regain d'intérêt, notamment celle des extinctions en masse, qui affectent en un court laps de temps de nombreux groupes très divers d'organismes – et paraissent éventuellement liées à des phénomènes catastrophiques.

Refaire des extinctions l'un des sujets centraux de la recherche paléontologique est en soi une petite révolution, même si relativement peu de paléontologues semblent en avoir pris conscience, ce qui est d'ailleurs paradoxal, parce que les récents débats sur

la question ont souvent été pour le moins vigoureux, notamment au sujet de la grande extinction de la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années. Il est vrai que physiciens, astronomes et géochimistes ont souvent occupé la première place dans les débats en question, mais il n'en est pas moins vrai que la question des extinctions en masse et de leurs causes remet la paléontologie au cœur d'un des débats majeurs des sciences de la Terre, position qu'elle n'avait pas occupée depuis longtemps. L'intérêt majeur des grandes crises environnementales qui ont affecté à plusieurs reprises notre planète, quelles que soient leurs causes exactes, est leurs effets sur le monde vivant. Ce sont d'ailleurs les données paléontologiques qui permettent de repérer ces crises. Pour prendre l'exemple le plus connu, il est clair que l'impact d'un astéroïde de la limite Crétacé-Tertiaire n'aurait pas suscité autant d'intérêt s'il avait simplement laissé un énorme cratère, aujourd'hui invisible dans la topographie, sur la côte du Yucatán, et une mince couche d'argile contenant de curieuses anomalies géochimiques et minéralogiques au sein des sédiments déposés à cette époque dans le monde entier. Ce qui a rendu célèbre cet impact, c'est qu'il a provoqué une des plus sévères extinctions en masse, dont les dinosaures, entre autres, ont été les victimes. Les centaines d'articles publiés sur ce sujet, depuis 1980, par des scientifiques issus des disciplines les plus diverses tournent fondamentalement autour d'un problème paléontologique.

Que reste-t-il à dire aux paléontologues sur de tels sujets ? Beaucoup de choses, et leur contribution sera essentielle. En effet, découvrir le ou les phénomènes physico-chimiques à l'origine d'une grande crise environnementale est une étape cruciale, mais il reste à comprendre le lien exact entre ces phénomènes et leurs effets sur les êtres vivants.

Les paléontologues sont bien évidemment les mieux placés pour répondre à ces questions qui sont d'ordre biologique. Une des caractéristiques des extinctions en masse est qu'elles sont sélectives : alors que certains groupes d'organismes sont complètement éliminés (les dinosaures, par exemple), certains survivent (les crocodiliens), parfois sans être apparemment affectés. La naïveté des explications proposées à ce phénomène par des non-biologistes est parfois étonnante, et, dans ce

domaine en particulier, il reste énormément à faire aux paléontologues d'abord pour déterminer précisément quelles espèces s'éteignent et quelles survivent, ensuite proposer des explications biologiquement acceptables.

La paléontologie du futur aura donc à se pencher sur la question des extinctions, bien plus qu'elle ne l'a fait depuis près de deux siècles, et l'on peut certainement s'attendre à des découvertes intéressantes dans l'explication des phénomènes de disparition des espèces. Contrairement à ce que l'on a pu croire aux débuts de la paléontologie évolutive, et à ce que quelques chercheurs, extrêmement minoritaires, essaient encore de prouver aujourd'hui, les espèces ne sont pas vouées à l'extinction par de mystérieux mécanismes internes. Tout au contraire, les liens entre l'histoire des organismes et celle de leur environnement apparaissent de plus en plus clairement. Les grandes crises de l'environnement terrestre, quelles que soient leurs causes (et il est probable qu'elles furent diverses), ont eu une influence considérable sur le déroulement de l'histoire de la vie sur Terre, et y ont introduit un élément de hasard, ou de contingence, non négligeable.

Dire que l'évolution des êtres vivants et l'évolution de la planète qui les porte sont inséparables peut apparaître comme une banalité, mais c'est une constatation simple qui peut montrer la voie de certains développements futurs de la paléontologie. Dès l'avènement de la tectonique des plaques, et parfois même avant, les paléontologues ont compris que l'histoire des plantes et des animaux devait être interprétée en fonction des déplacements continentaux et des ouvertures océaniques. Mais la géographie n'est bien sûr qu'un des aspects du problème. Ce sont les changements de l'environnement dans son ensemble, y compris ceux de la composition de l'atmosphère, du climat, des circulations océaniques, etc., qui doivent être pris en considération pour comprendre les influences qui se sont exercées sur l'évolution des êtres vivants. La reconstitution des environnements du passé n'est pas chose aisée, mais les études en ce domaine se multiplient, avec par exemple la production de modèles climatiques pour des périodes de plus en plus anciennes. La paléontologie est en mesure de jouer un rôle considérable dans l'élaboration de tels modèles, parce qu'elle fournit des don-

nées concrètes qui peuvent être confrontées aux modèles théoriques, et éventuellement les réfuter. Cela peut être aisément illustré par les travaux sur les périodes de crise ou de catastrophe, pour lesquelles certains modèles proposés se révèlent inadéquats, car ils sont en contradiction avec les données paléontologiques. Ainsi, les scénarios qui postulent une baisse considérable et durable des températures à la limite Crétacé-Tertiaire doivent être rejetés, pour la simple raison que beaucoup de reptiles, dont on sait que les représentants actuels ne résistent pas au froid, ont survécu aux événements de cette période.

L'évolution n'est pas un long fleuve tranquille

La vision uniformitariste et statique de l'histoire de la Terre qui a dominé la géologie pendant plus d'un siècle a commencé à s'effacer, au profit d'une vision plus dynamique, avec l'hypothèse de la dérive des continents, puis avec l'avènement de la tectonique des plaques. Elle est battue en brèche d'une façon encore plus sévère par le retour du catastrophisme qui souligne l'importance des périodes de crise. Dans un tel contexte, il n'est plus possible de concevoir l'évolution générale des êtres vivants comme un déroulement calme et majestueux. C'est une histoire pleine de bruit et de fureur qu'il faut sans doute envisager, et c'est dans ce cadre renouvelé que se feront sans doute les grandes découvertes paléontologiques de demain. Mais, quelles que soient les approches utilisées, à la source des progrès les plus spectaculaires il y aura toujours la recherche et la découverte de nouveaux fossiles sur le terrain.

Éric BUFFETAUT est directeur de recherche au CNRS.

Éric BUFFETAUT, *Dinosaures. À la recherche d'un monde perdu*, L'Archipel, 1997.

Rob DESALLES et David LINDLEY, *La science de Jurassic Park*, Bayard Éditions, 1997.

Walter ALVAREZ, *La fin tragique des dinosaures*, Hachette, 1998.

Éric BUFFETAUT, *Histoire de la paléontologie*, collection «Que sais-je?», Presses universitaires de France, 1998.

Les fossiles, témoins de l'évolution, collection Bibliothèque Pour la Science.
