

SOUS LA DIRECTION
DE STEVE PARKER

PRÉFACE
ALICE ROBERTS

Évolution

LA GRANDE HISTOIRE DU VIVANT

____ ÉVOLUTION ____
LA GRANDE HISTOIRE DU VIVANT



__ ÉVOLUTION __

LA GRANDE HISTOIRE DU VIVANT

Traduction
DENIS RICHARD

Coordination
STEVE PARKER

Préface
ALICE ROBERTS


delachaux
et niestlé

TABLE DES MATIÈRES

Édition originale :

Titre original : *Evolution : the whole story*

© Quintessence Editions Ltd., 2015

Édition française :

© Delachaux et Niestlé, Paris, 2018

Dépôt légal : septembre 2018

ISBN : 978-2-603-02546-8

Impression : Midas Printing International Ltd., Chine

Traduction : Denis Richard

Préparation, mise en pages, relecture : Nord Compo, Villeneuve d'Ascq

Couverture : Nord Compo, Villeneuve d'Ascq

Tous droits réservés pour tous pays. Cet ouvrage ne peut être reproduit, même partiellement et sous quelque forme que ce soit (photocopie, décalque, microfilm, duplicateur ou tout autre procédé analogique ou numérique), sans une autorisation écrite de l'éditeur.

PRÉFACE *par Alice Roberts* 6

INTRODUCTION 8

ÂGES DE LA TERRE 20

 **1** | PREMIÈRES FORMES DE VIE 22

 **2** | VÉGÉTAUX 54

 **3** | INVERTÉBRÉS 98

 **4** | POISSONS ET AMPHIBIENS 172

 **5** | REPTILES 228

 **6** | OISEAUX 370

 **7** | MAMMIFÈRES 416

GLOSSAIRE 560

CONTRIBUTEURS 563

INDEX 564

CRÉDITS ICONOGRAPHIQUES 574

CHARTRE Delachaux et Niestlé

- ① L'éditeur nature de référence depuis 1885.
 - ② Le fonds éditorial le plus complet en langue française avec plus de 400 ouvrages consacrés à la nature et à l'environnement.
 - ③ Des auteurs scientifiques et naturalistes reconnus.
 - ④ Les meilleurs illustrateurs naturalistes, pour la précision et le réalisme.
 - ⑤ Des ouvrages spécifiquement adaptés à l'utilisation sur le terrain.
 - ⑥ Des contenus actualisés régulièrement pour relayer les avancées scientifiques les plus récentes.
 - ⑦ Une démarche éco-responsable pour la conception et la fabrication de nos ouvrages.
 - ⑧ Une approche pédagogique qui sensibilise les plus jeunes à l'écologie.
 - ⑨ Une réflexion qui éclaire les grands débats sur l'environnement (biodiversité, changement climatique, écosystèmes).
 - ⑩ Une implication aux côtés de tous ceux qui œuvrent en faveur de la protection de l'environnement et de la conservation de la biodiversité.
- Retrouvez-nous sur www.delachauxetniestle.com et sur Facebook

PRÉFACE

Un débat anima en 1860 le Muséum d'histoire naturelle de l'université d'Oxford. Il résonna dans un vaste hall qui existe toujours, bien que désormais scindé par une mezzanine en une « salle Huxley », en haut, et une « salle Wilberforce », en bas, dont les deux noms ne sont autres que ceux des protagonistes qu'opposa ce différend.

C'est à l'issue d'une conférence sur l'évolution faite par un universitaire américain qu'une violente confrontation ne tarda pas à opposer les deux hommes, et, bien au-delà, la science et la religion. L'évêque d'Oxford, Samuel Wilberforce, s'était élevé violemment contre une théorie innovante qui faisait de l'évolution la résultante de la sélection naturelle. Après avoir ouvertement récusé le fait qu'une espèce puisse changer avec le temps, il humilia Thomas Henry Huxley, l'un des scientifiques présents, connu par la suite comme le « bouledogue de Darwin » : ce dernier, fort de cette théorie, prétendait-il plutôt descendre du singe du côté de son grand-père ou de sa grand-mère ?

On ignore les termes exacts de la réponse d'Huxley à cette interrogation sarcastique, mais voici ce qu'il prétendit par la suite avoir rétorqué : « Si donc la question était de savoir si j'eusse préféré avoir pour grand-père un singe misérable ou un homme auquel la nature avait tout donné et doté d'une grande influence mais qui employait ses capacités et son pouvoir de persuasion pour ridiculiser une discussion scientifique sur un sujet essentiel, je répondis sans l'ombre d'une hésitation que j'eusse choisi le singe. »

Un commentateur de l'époque se souvint qu'Huxley souhaitait bien ce jour-là répondre ce qu'il avait dit, murmurant en premier : « Le Seigneur t'avait livré entre mes mains... » (NDT : allusion à une parole de la Bible) avant de poursuivre à haute voix : « Je préférerais être le fruit de l'union de deux singes qu'être un homme effrayé par la vérité. »

Peu important les termes : la contribution d'Huxley au débat sur l'évolution est entrée dans la légende. Je pense que cette joute oratoire est restée légendaire en raison de la peur que suscite tout ce qui a trait à l'évolution. En tant qu'êtres humains, nous avons toujours cherché à nous ériger sur un piédestal et à nous considérer comme supérieurs à toute autre forme de vie. Faire de l'Homme une création spécifique, fruit d'une intelligence supérieure, contrarie l'idée que nous résultons d'une sélection naturelle spontanée et que nous avons évolué comme toute autre espèce : accepter l'évolution implique donc de comprendre que l'homme est un animal. En reconnaissant publiquement et avec humilité son origine, Huxley a montré qu'il s'en remettait à la vérité scientifique – quand bien même elle pouvait le faire tomber de son piédestal, comme l'humanité entière.

Même si les humains sont sans doute des animaux particuliers, et plus encore des singes singuliers, il est totalement impossible d'imaginer qu'ils soient le fruit d'une création spécifique au vu des preuves accumulées : notre corps et notre génome ressemblent à ceux des autres animaux, notamment à ceux des primates, et nous avons découvert de nombreux restes fossiles de nos ancêtres.

Cinq semaines avant le fameux débat d'Oxford, Wilberforce avait déjà publié une charge accablante contre *L'Origine des espèces* de Darwin. Il soulignait l'absence de fossiles prouvant qu'une espèce se transforme progressivement en une autre et, dans une certaine mesure, il avait raison sur ce point car les fossiles découverts et étudiés restaient encore peu nombreux au milieu

du XIX^e siècle. Bien sûr, il subsiste des lacunes dans nos connaissances : n'est-il pas, après tout, très exceptionnel qu'un organisme mort se fossilise ? Cependant, un grand nombre d'autres fossiles ont été mis au jour depuis l'époque de Darwin et nous connaissons ainsi des amphibiens primitifs faisant la transition entre des organismes aquatiques et d'autres terrestres, de lointains dinosaures à plumes préfigurant les oiseaux, des ancêtres des baleines ayant perdu leurs pattes postérieures et de nombreux restes d'hominidés – une famille de singes marchant sur deux jambes qui comprenait *Homo sapiens*.

Les fossiles d'hominidés démontrent aussi que l'humanité n'est pas apparue soudainement. Des caractères tenus comme consubstantiellement associés à l'homme se sont manifestés progressivement, sur une période très longue et ce n'est qu'en considérant le passé que nous pouvons constater que leur accumulation a permis, à un moment donné, de dire « c'est un homme ».

En fait, vous pouvez retracer de la même façon l'histoire évolutive de n'importe quel organisme vivant et vous trouverez toujours la même chose : une somme de petites évolutions conduisant à l'apparition d'une espèce aujourd'hui familière. Cette quête nous renvoie aux ancêtres que nous partageons avec d'autres espèces, puis avec des groupes entiers jusqu'à ce qu'il soit possible de construire l'incroyable arbre phylogénétique liant les organismes vivants de la planète. L'évolution n'explique donc pas seulement le développement de chaque espèce – la nôtre comprise –, mais celui de toute la biodiversité terrestre.

Le phénomène progresse lentement, aussi bien au niveau génétique qu'à celui de l'apparence extérieure des espèces, mais le recul permet de repérer des étapes clés ayant eu d'importantes conséquences sur l'avenir de la vie : l'apparition des premiers eucaryotes ouvrant la voie à l'évolution d'organismes complexes, la sortie de l'eau, l'apparition des plantes à fleurs et leur coévolution avec les insectes pollinisateurs, etc. Ces pages feront découvrir les caractéristiques propres à certains végétaux ou animaux et permettront de replacer ces espèces dans leur contexte évolutif grâce à des échelles chronologiques positionnant les événements les uns par rapport aux autres.

Révélant idéalement la beauté de la biodiversité passée comme présente, ce livre constitue une introduction à la connaissance de la vie, en partant des traces les plus anciennes de créatures préservées dans les roches pour s'intéresser aux végétaux, puis aux groupes essentiels d'animaux. Plus que de décrire des modalités d'adaptation, il met en lumière la dynamique qui prévalut à l'apparition d'espèces nouvelles, montrant que chacune – la nôtre comprise – est connectée aux autres par des ancêtres communs et des cousins encore vivants. Nous ne sommes finalement qu'un rameau ténu du grand « arbre de la vie ».



ALICE ROBERTS
ANATOMISTE ET ANTHROPOLOGUE, AUTEURE, PRÉSENTATRICE DE DOCUMENTAIRES
BRISTOL, ROYAUME-UNI

INTRODUCTION

Le monde actuel compte au moins 8 millions d'espèces – et probablement davantage –, qu'il s'agisse d'animaux, de végétaux et d'autres organismes vivants. Lorsque la Terre s'est formée puis refroidie, il y a quelque 4,5 milliards d'années, elle était inhospitalière. Il fallut attendre un milliard d'années pour que la vie y apparaisse sous la forme d'organismes unicellulaires primitifs et que l'évolution du vivant commence, puis plus de 2 milliards d'années furent nécessaires pour voir des créatures flotter à la surface des océans. Ce livre nous propose de revivre cette aventure, de ses prémices à notre époque. L'échelle des âges de la Terre (voir page 20) montre que la période la plus prolongée, la première, forme le précambrien.

Le chapitre 1 présente les tout premiers développements de la vie, qui menèrent d'une cellule isolée ayant une structure interne relativement simple, dite procaryote (voir page 36), à des cellules plus complexes, dites eucaryotes, en les illustrant par des organismes unicellulaires encore présents dans des environnements extrêmes tels que ceux qui caractérisaient la Terre encore jeune. Il y a environ 2,3 milliards d'années, ces organismes microbiens produisirent une grande quantité d'oxygène qui se répandit dans l'atmosphère et dans les océans, constituant un événement connu comme la « Grande Oxygénation », ou « Grande Oxydation ». L'évolution prit alors une autre direction. Les cellules, d'abord isolées, s'agrégèrent en amas lâches, puis en colonies, et enfin constituèrent des agencements plus sophistiqués où certaines se spécialisèrent et réalisèrent des fonctions spécifiques interdépendantes. Ces premiers organismes furent à la base de l'apparition de végétaux multicellulaires (voir page 56), puis d'animaux. Toute cette partie de l'évolution s'opéra dans les océans.

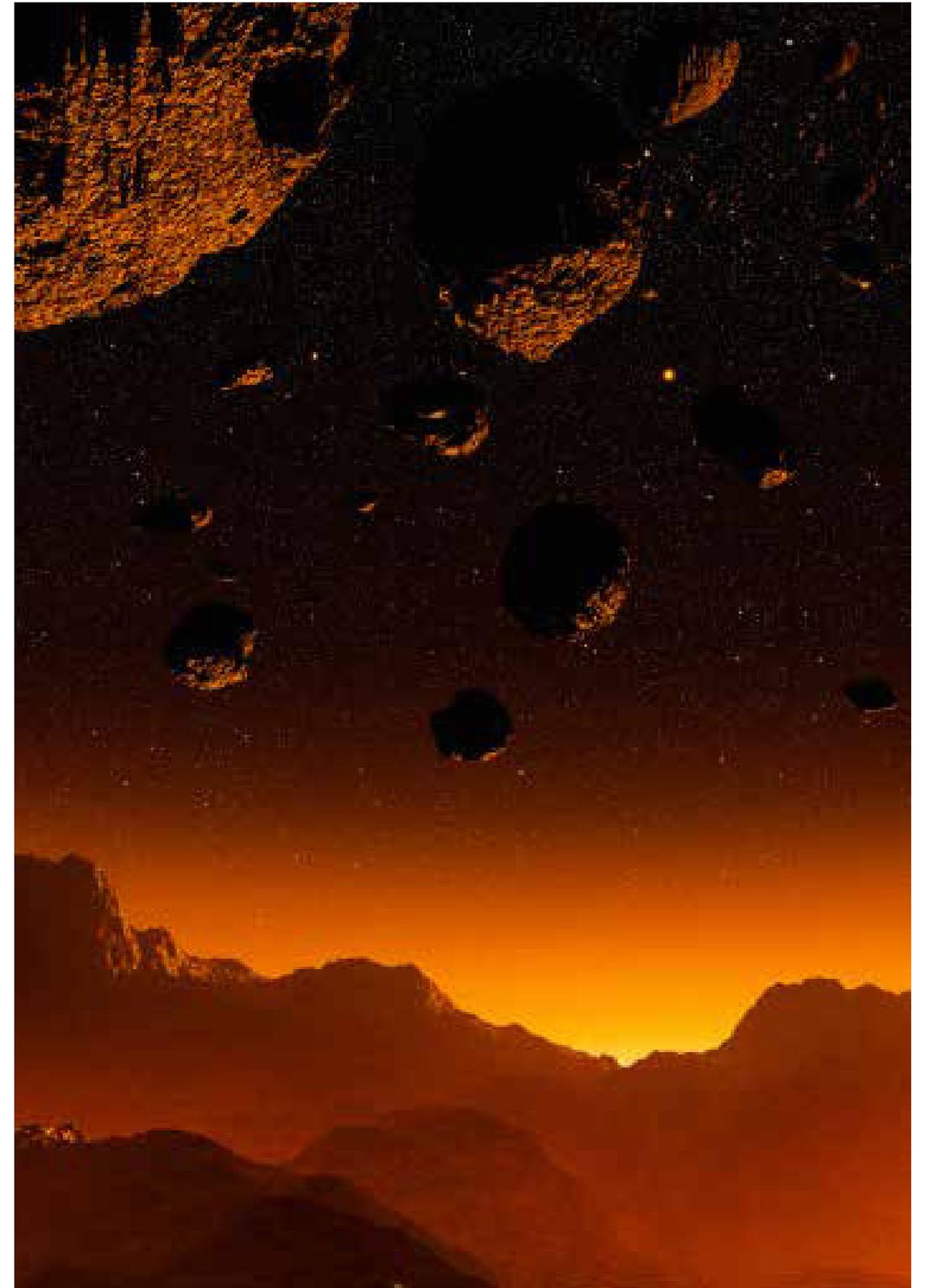
Ce livre présente un choix d'espèces clés, éteintes ou actuelles, qui illustrent une étape particulière du processus évolutif : certaines persistent, relativement identiques, depuis un temps considérable, alors que d'autres font la transition entre deux groupes ou présentent des spécificités (NDT : spécificités entendues au sens du programme mondial EDGE – *Evolutionarily Distinct and Globally Endangered* –, dédié à la conservation des espèces menacées présentant des qualités évolutives uniques). Chacune d'elles est accompagnée de son nom scientifique, son groupe, sa taille, sa localisation et, s'agissant de celles encore vivantes, de son statut de conservation selon l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature). Les groupes clés sont précédés d'un texte résumant les étapes de leur diversification et leurs caractères propres et accompagnés d'une table chronologique ordonnée selon l'échelle des temps géologiques.

Les fossiles constituent les pièces cardinales d'un puzzle permettant l'étude des espèces éteintes. Les plus anciens vestiges témoignant de l'existence de la vie sont des dômes rocheux appelés stromatolithes (voir page 42) – qui se forment toujours –, ainsi que les créatures mystérieuses constituant la faune de l'Édiacarien (voir page 46). Ces organismes diversifiés, à corps mou, vivant au fond de mers peu profondes, questionnent les scientifiques qui, malgré leurs efforts, peinent à les classer dans l'un ou l'autre des groupes actuels : peut-être témoignent-ils de cheminements évolutifs ayant avorté sans laisser de descendance ?

L'évolution semble s'être accélérée à partir de la fin du superéon précambrien, il y a 541 millions d'années, puis durant le cambrien, mais peut-être est-ce la conséquence de l'apparition d'organismes dotés d'une carapace protectrice se fossilisant plus facilement en nombre. Des fouilles conduites dans les grès de Burgess, au Canada (voir page 50), ou à Chengjiang, en Chine, prouvent que la biodiversité marine avait alors déjà atteint des niveaux comparables à ce que

► À l'époque de leur formation, il y a 4,5 milliards d'années, la Terre et les trois autres planètes rocheuses du système solaire interne étaient inhospitalières pour toute forme de vie. La taille de ces protoplanètes s'accrut au fur et à mesure qu'elles attirèrent par gravité d'énormes quantités de roches présentes dans l'espace autour d'elles.

▼ Ce fossile d'algues calcaires est daté du cambrien, il y a 541 à 485 millions d'années (Colorado School of Mines, États-Unis).



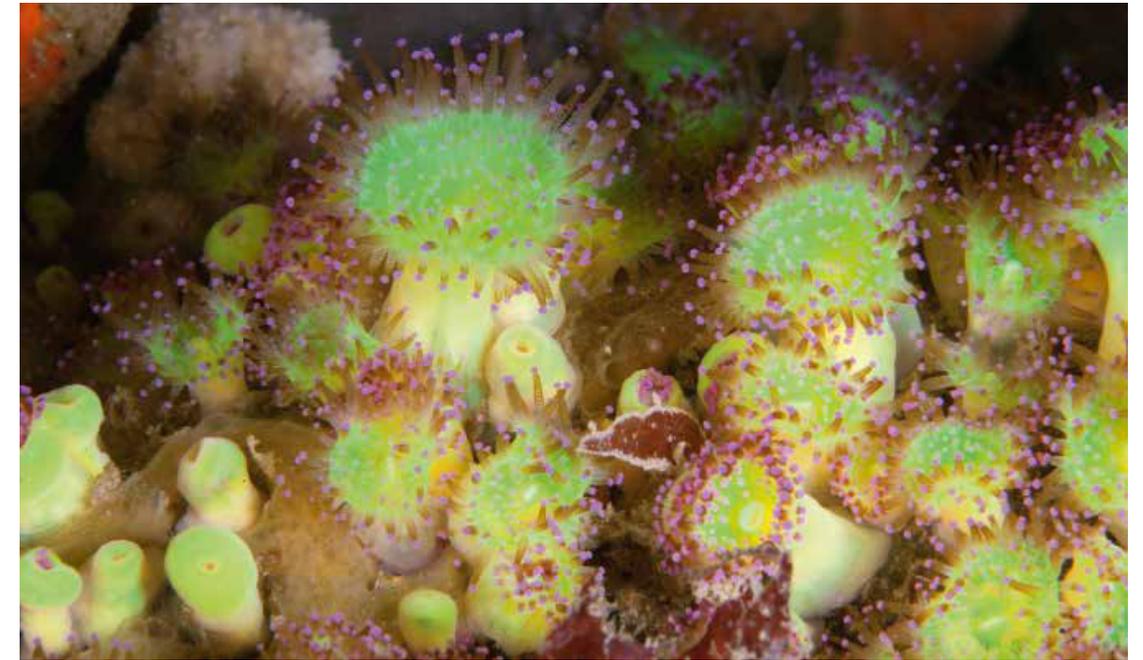
nous connaissons, ce qui contredit une approche ancienne qui dessinait un « arbre de la vie » débutant par quelques organismes épars pour s'étoffer progressivement, aussi bien en nombre d'espèces que d'individus. En fait, l'analogie avec un « arbre » fut défendue par le biologiste allemand Ernst Haeckel (1834-1919), pour être par la suite sans cesse reprise sous diverses formes, sans jamais refléter la réalité.

Comme décrit dans le chapitre 2, les végétaux ont constitué un préalable au développement de la plupart des organismes vivants sur la planète. La photosynthèse leur permet de capter l'énergie du rayonnement solaire, de la transformer en énergie chimique, de l'intégrer à leurs tissus et de devenir ainsi une source de nourriture pour les animaux. Un progrès majeur survint il y a plus de 400 millions d'années, lorsque de simples algues aquatiques livrèrent les premiers végétaux terrestres, qui développèrent ensuite des vaisseaux conducteurs comme ceux que révèlent les fossiles de la flore de Rhynie en Écosse (voir page 62). Les animaux qui s'aventurèrent sur la terre purent dès lors y disposer de nourriture et d'abris. Les plantes continuèrent à se diversifier en mousses, en fougères et en autres familles productrices de spores.

Nouvelle étape cardinale dans leur évolution : la reproduction par graines comprenant un minuscule embryon accompagné d'une réserve nutritive et non plus par simples spores. Elle produisit les fougères à graines aujourd'hui disparues (voir page 70), les conifères et leurs cônes, leurs cousins les cycadales et les ginkgoales et, il y a quelque 150 millions d'années (peut-être auparavant), les plantes à fleurs, ou angiospermes. Ce dernier groupe, comprenant aussi les graminées, les volubiles, les buissons et les arbres feuillus, domine désormais la vie végétale sur la planète en représentant plus de 80 % des espèces de plantes.

Au fur et à mesure de leur diversification, dans l'eau comme sur terre, les plantes furent suivies par les animaux herbivores qui apprirent à exploiter au mieux les ressources nutritives et les abris qu'elles leur offraient : le chapitre 3 présente ces premiers animaux, des invertébrés apparus dans les mers. Les plus simples n'avaient pas de muscles, de nerfs, de cœur, de sang ou de cerveau : c'était des spongiaires (« éponges ») (Porifera). Ces organismes existent toujours, tout

▼ Les fougères apparurent il y a 350 millions d'années : ces frondes fossilisées datent du carbonifère supérieur, il y a 323 à 299 millions d'années. Dominant alors les paysages terrestres, elles s'accumulèrent en formant des couches épaisses de charbon (un type particulier de carbone), d'où le nom donné à cette période géologique : le carbonifère.



comme les coraux à l'origine des premières grandes structures vivantes fossilisées, en fait des cnidaires (Cnidaria) – groupe comprenant aussi les anémones de mer ou les méduses. Les mollusques constituèrent un autre groupe important d'invertébrés : comptant actuellement 85 000 espèces, il fédère les bivalves et les gastéropodes, les ammonoïdes (ammonites) aujourd'hui éteints et les nautiloïdes (le nautilé actuel est l'unique relicté de ce groupe jadis très diversifié).

Les échinodermes (comme les étoiles de mer, les oursins et les crinoïdes) laissèrent aussi de multiples vestiges fossiles : ils comptent de nos jours environ 7 000 espèces marines.

Des espèces de vers diversifiées apparurent il y a 500 millions d'années. Le péripate, ou « ver-de-velours », en est un exemple vivant particulièrement curieux : cet onychophore du genre *Peripatus* (voir page 112) constitue un modèle plausible illustrant l'apparition de pattes chez les vers et concrétisant une étape menant vers les premiers arthropodes (littéralement : « pattes articulées »). Très vaste, ce groupe inclut les trilobites, jadis nombreux mais tous disparus (voir page 118), et les crustacés, dont les crabes et les crevettes. Ils suivirent les plantes sur la terre, où certains arthropodes pionniers évoluèrent et donnèrent les insectes qui constituent de très loin aujourd'hui le groupe d'organismes vivants le plus important avec plus d'un million d'espèces. Les arthropodes comprennent également les myriapodes (diplopedes, ou « mille-pattes » ; chilopodes, ou « centipattes ») et les arachnides (araignées, scorpions, acariens et tiques). Cousins des arachnides, les limules n'ont guère changé depuis des millions d'années ; les scorpions de mer (voir page 136) ont, eux, disparu depuis longtemps.

L'évolution des vertébrés est complexe. Comme l'explique le chapitre 4, les plus anciens furent les poissons issus de créatures vermiformes comme *Pikaia* (voir page 176), dotées d'une structure rigidifiant le corps, la notocorde (probable ancêtre de la colonne vertébrale), et appartenant aux cordés. De ce fait, les vertébrés que nous nommons « poissons » ne constituent pas un groupe naturel : de nombreux types apparurent à diverses époques, probablement à partir d'ancêtres multiples. Les premiers poissons furent les agnathes (voir page 178) : ils n'avaient pas de nageoires, ou ces dernières étaient très réduites, et étaient dépourvus de mâchoires

▲ L'anémone-bijou (*Corynactis viridis*) colonise les fonds au voisinage de la pointe Guillaumesse (Guernesey). Comme d'autres anémones, elle peut se diviser par voie asexuée, ce qui produit des clones qui se jouxtent en formant d'extraordinaires « quilts » aux couleurs tapageuses.



▲ Un banc de requins-marteaux (*Sphyrna lewini*) au voisinage de l'île Cocos (Costa Rica). La forme de la tête de ce poisson évoque celle d'un hydroptère, avec de grandes extensions aplaties facilitant la nage. Elle porte aussi des capteurs sensibles aux stimuli chimiques et électriques qui, joints à un champ de vision extrêmement élargi, optimisent la détection des proies.

— ils sont encore représentés par les lamproies et les myxines. Nageoires et mâchoires ne furent pas longues à apparaître pour prendre leur plein développement chez un super-prédateur du dévonien, un terrifiant placoderme d'une dizaine de mètres vivant il y a 360 millions d'années, *Dunkleosteus* (voir page 188).

Certaines lignées de poissons formèrent le groupe des chondrichthyens dotés d'un squelette cartilagineux : ils comptaient les élamobranthes (requins et raies) et les holocéphales, ou chimères. Survivants de la préhistoire, les requins n'ont guère évolué depuis 400 millions d'années.

D'autres poissons acquirent un squelette osseux : les ostéichthyens. Parmi eux, le groupe dominant est constitué des actinoptérygiens (voir page 202) qui fédèrent l'immense majorité des poissons que nous connaissons, du minuscule gobie à l'énorme marlin, en passant par le poisson-lune. Leurs nageoires soutenues par des rayons osseux en éventail leur permettent de contrôler avec précision leurs mouvements natatoires. Bien que les sarcoptérygiens (voir page 196) soient beaucoup moins nombreux que les actinoptérygiens, leur cheminement évolutif ne peut être négligé : ils englobent les dipneustes (capables de respirer de l'air) et les coelacanthes. La découverte au sud de l'Afrique de ces derniers, longtemps tenus pour éteints, constitua en 1938 un événement scientifique majeur. Leurs nageoires sont formées de moignons musculieux à partir desquels l'évolution, à travers des espèces fossiles telles que *Tiktaalik*, *Acanthostega*, *Ichthyostega* et *Pederpes*, produisit les quatre membres des vertébrés comme les amphibiens, les reptiles, les oiseaux et les mammifères, c'est-à-dire des tétrapodes (voir page 206). Cela dit, l'hypothèse faisant du coelacante l'ancêtre de ces animaux est totalement erronée : bien plus ancien, celui-ci reste toujours inconnu de la science.

Le premier groupe important de tétrapodes fut celui des amphibiens, encore dépendants du milieu aquatique pour pondre leurs œufs. Il y a 300 millions d'années, certains, comme *Eryops*, devinrent des prédateurs d'une taille importante ayant des mœurs proches de celles des crocodiles. C'est pour cette raison que le permien (299-252 MA) fut appelé l'« âge des amphibiens », comme le dévonien (419-359 MA) avait été l'« âge des poissons » : ces dénominations donnent une idée d'une

dominante évolutive, mais masquent une réalité plus contrastée. Plusieurs groupes cardinaux d'amphibiens disparurent après le permien et le trias, ne laissant que les actuels lissamphibiens (grenouilles, crapauds, salamandres, tritons et cécilies).

Avant que de grands amphibiens ne dominent les terres, certains évoluèrent et donnèrent les premiers reptiles : s'ouvrant sur ces chaînons intermédiaires, le chapitre 5 présente les fossiles des plus anciens reptiles connus. *Hylonomus*, daté de 312 millions d'années (voir page 232), ressemblait à un lézard, mais cette apparence était trompeuse : il appartenait à un groupe différent. Les reptiles se diversifièrent : apparurent les chéloniens, ou tortues, les squamates (lézards et serpents), les crocodyliens (crocodiles, alligators, caïmans et leurs cousins désormais éteints). Le tuatara (voir page 234), sorte de lézard de Nouvelle-Zélande formant à lui seul une lignée de reptiles, est apparenté à des espèces disparues depuis plus de 100 millions d'années. Tout comme le métasequoia, la limule, le coelacante et d'autres espèces sélectionnées dans ce livre pour leur singularité évolutive, le tuatara est parfois qualifié de « fossile vivant », mais ce terme imprécis et informel supposerait qu'il soit demeuré identique à ses ancêtres, alors qu'en fait il n'a cessé d'évoluer.

Apparurent aussi plusieurs groupes de reptiles aujourd'hui éteints de longue date, notamment dans les mers, avec les nothosaures, les plésiosaures, les pliosaures, les ichthyosaures et les mosasaures, alors que les ptérosaures s'imposaient dans le ciel. Sur terre, un groupe de reptiles domina comme aucun autre groupe animal auparavant : les dinosaures. La plupart de ces lignées disparurent lors de la cinquième grande extinction de masse, à la fin du crétacé, il y a 66 millions d'années (voir page 364). Pour autant, à la lumière des techniques récentes permettant de relier les organismes vivants, les dinosaures restent présents parmi nous, représentés par l'un de leurs sous-groupes : les oiseaux.

Ces derniers évoluèrent à partir de petits saurischiens carnivores il y a 150 millions d'années, comme le dépeint le chapitre 6. Ils comptèrent l'un des animaux préhistoriques les plus célèbres, *Archaeopteryx* (voir page 376). Les premières étapes de leur diversification ne sont pas éclaircies, et plusieurs groupes apparurent, puis disparurent au crétacé, il y a 145 à 66 millions d'années. Durant les 50 derniers millions d'années, leur évolution produisit de véritables géants dont les « oiseaux de terreur », incapables de voler et représentés notamment par *Phorusrhacos* (voir page 410). Les moas géants de Nouvelle-Zélande (voir page 412) et les énormes oiseaux-éléphants (voir page 414) de Madagascar disparurent au dernier millénaire, victimes des persécutions humaines.

Une voie évolutive très différente, décrite dans le chapitre 7, voit probablement des tétrapodes ressemblant à des amphibiens donner des reptiles synapsidés,



◀ Émergeant ici de son œuf, le tuatara (*Sphenodon punctatus*) est un reptile endémique de Nouvelle-Zélande. Bien que ressemblant à un lézard, il appartient à une lignée distincte, celle des rhynchocéphales, qui ne compte plus que deux espèces vivantes. Les tuataras ont un ancêtre commun avec le groupe des lézards et des serpents, ce qui permet de mieux comprendre leur évolution, ainsi que celle des autres diapsidés, groupe incluant les dinosaures (et donc les oiseaux) et les crocodiles.



▲ Ce crâne fossile est celui d'un « tigre à dents de sabre », carnivore éteint du groupe des Machairodontinae. Plusieurs espèces peuplaient l'Europe, l'Asie, l'Afrique, l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud durant une période s'étageant de 25 millions d'années à quelque 10 000 ans. Ouvrant largement leur gueule, ces félins égorgaient leurs proies avec leurs énormes canines supérieures.

dont le célèbre *Dimetrodon* (voir page 328), puis, de là, aux soi-disant « reptiles mammaliens », ou thérapsides (voir page 418).

C'est à partir de certains d'entre eux que les premiers mammifères apparurent il y a environ 220 millions d'années (voir page 424). Demeurant d'une importance faunistique mineure durant la prédominance des dinosaures, ils se diversifièrent rapidement après l'extinction de la fin du crétacé et formèrent de nombreuses lignées, dont certaines n'existent que durant quelques dizaines de millions d'années. Au nombre des groupes les plus importants, les monotrèmes, encore représentés par l'ornithorynque et l'échidné, les thériens, incluant les mammifères à poche, ou marsupiaux (environ 340 espèces encore vivantes), et les placentaires (plus de 5 000 espèces actuelles) chez lesquels le jeune se développe jusqu'à sa naissance dans le ventre de sa mère, nourri grâce au placenta.

Parmi les mammifères, un groupe resta discret durant les derniers 50 millions d'années : celui des primates. Il y a 6 millions d'années, l'une de ses lignées conduisit à l'apparition du genre *Homo* (voir page 530). Durant les derniers 200 000 ans, l'espèce de l'homme actuel, *Homo sapiens* (voir page 536), parvint à dominer toute forme de vie sur la planète comme aucun autre animal auparavant.

Les preuves témoignant de l'histoire longue et tourmentée de la Terre, de ses changements environnementaux et de l'évolution de ses organismes vivants sont conservées dans les roches sous forme de fossiles. Paléontologues et géologues, les ayant dégagés et étudiés depuis plus de deux siècles, en ont déduit la présente synthèse, mais cette histoire reste loin d'être complète. La formation des fossiles (voir page 28) fut elle-même complexe et inconstante selon les époques et les endroits ; de plus, les aléas géologiques les ont considérablement altérés. La fossilisation est favorisée par un environnement aquatique d'eaux peu profondes, ce qui explique que les organismes ayant vécu dans les abysses océaniques ou les zones d'altitude ne soient que pauvrement représentés. Elle favorise aussi la conservation des organes durs tels que le bois, l'écorce, les cônes, les racines, les graines, les pollens, les coquilles, les carapaces, les dents, les griffes ou les cornes : les parties molles ne sont préservées que dans des circonstances exceptionnelles. Ces parties dures elles-mêmes peuvent être d'ailleurs endommagées : les squelettes, par exemple, sont disloqués et les os abrasés au point qu'il est parfois impossible de les identifier. La fossilisation, toujours très sélective, s'accompagne d'une grande perte d'informations.

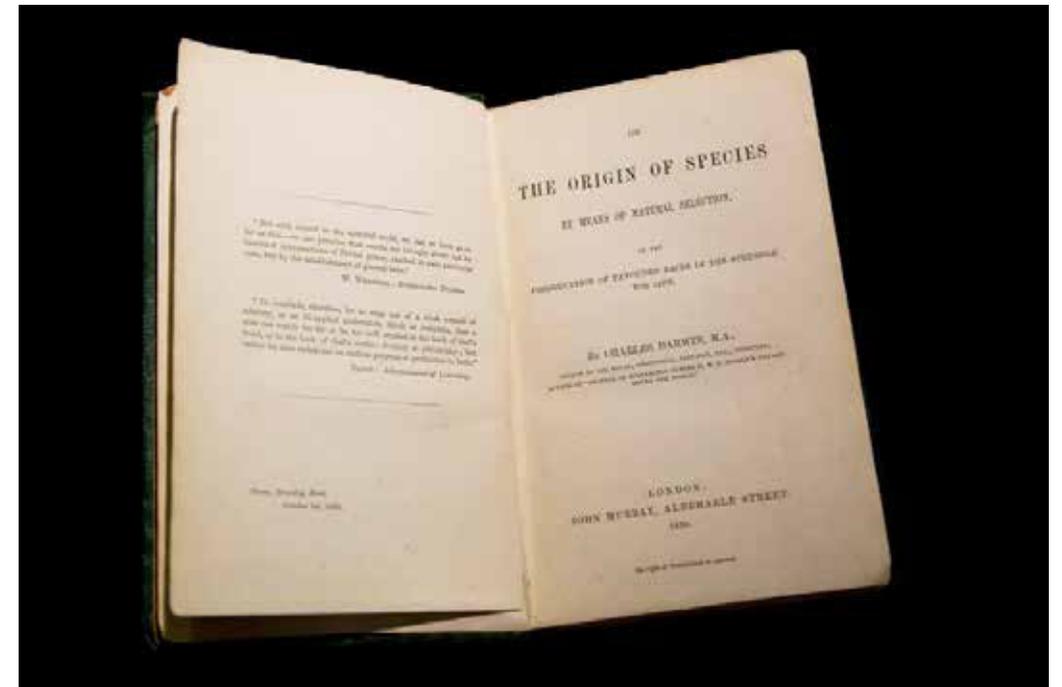
Il est indispensable de connaître ces limites pour trouver un sens à l'évolution. La biologie donne aux végétaux, aux animaux et aux autres organismes une identité internationale sous forme d'une dénomination binomiale associant un nom de genre à un nom d'espèce : le grand mammouth laineux de l'âge glaciaire est appelé *Mammuthus* (nom de genre) *primigenius* (nom d'espèce). Le nom d'espèce le distingue des autres mammouths comme le mammouth des steppes (*M. trogontherii*) ou le mammouth de Colomb (*M. columbi*). Ce système permet de rapprocher les créatures se ressemblant dans un système de groupes hiérarchisés.

L'histoire de la nomenclature des organismes vivants et la science de la taxonomie ont une longue histoire. Le philosophe grec Aristote (384-322 av. J.-C.) en jeta les linéaments lorsqu'il décrivit les divers types de reproduction des animaux et valida les termes de « genre » et d'« espèce ». Ce fut ensuite le botaniste suédois Carl Linné (1707-1778) qui fonda la taxonomie moderne. Ayant pour ambition de classer toutes les formes de vie ainsi que certains fossiles, son *Systema naturae* (dans ses éditions de 1735 à 1766-1768) inclut plus de 10 000 espèces de végétaux et d'animaux regroupées dans une hiérarchie allant de l'espèce au genre, puis à la famille, à l'ordre, à la classe, au phylum et au règne, le tout en fonction de similarités morphologiques. Bien que ce système ne fit aucune allusion à l'évolution, il constitua un cadre favorable aux découvertes qui suivirent un siècle plus tard.

Même si cette notion avait déjà été entrevue par des philosophes et des naturalistes de l'Antiquité, elle avait toujours été supplantée par la croyance dans le caractère « immuable » de la nature. Dans sa *Philosophie zoologique* (1809), le naturaliste français Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829) avança le premier que les créatures vivantes se complexifiaient sous l'effet d'une « force vitale » et postula que les caractères utiles acquis au cours de l'existence étaient fixés, puis transmis à la génération ultérieure, alors que les caractères inutiles disparaissaient peu à peu.

Cinquante ans plus tard, le naturaliste anglais Charles Darwin (1809-1882) publia *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie* (1859, titre de la première édition). Lors de son périple autour du monde entre 1831 et 1836, à bord du *HMS Beagle*,

▼ *L'Origine des espèces* (1859) de Charles Darwin – ici, un exemplaire de la première édition – détailla le processus fondamental à la base de la théorie moderne de l'évolution des organismes vivants.





▲ Le Moqueur d'Hispanola (*Mimus macdonaldi*) est l'une des espèces de moqueurs, toutes très proches, vivant dans l'archipel des Galápagos. Ces oiseaux comptent parmi les animaux qui permirent à Darwin de fonder sa théorie selon laquelle les espèces acquièrent des caractères qui leur sont avantageux dans un environnement spécifique.

il fut marqué par les groupes d'espèces similaires qu'il observa dans chaque région visitée, et notamment par les oiseaux moqueurs, les tortues géantes et les pinsons des Galápagos. À son retour, et alors qu'il avait connaissance de la théorie de Lamarck, il imagina le principe d'une évolution des espèces relevant d'un mécanisme différent : la sélection naturelle. Pour résumer sa pensée, la plupart des organismes ayant plus de descendants que nécessaire et ces derniers différant tous légèrement, celui qui possédait un caractère lui conférant un avantage face aux défis de la vie (pour trouver de la nourriture ou se dissimuler, pour résister aux aléas environnementaux, aux prédateurs, aux rivaux ou aux maladies, etc.) était « favorisé », atteignait plus probablement l'âge de la maturité sexuelle et produisait alors sa propre descendance. Si l'avantage était transmissible, celle-ci l'acquerrait aussi et était dès lors également favorisée.

Le hasard voulut qu'un autre naturaliste anglais, l'explorateur et collectionneur Alfred Russel Wallace (1823-1913), partageât l'approche de Darwin. Ils correspondirent en 1856-1857 et Darwin resta reconnaissant à Wallace des contributions dont il enrichit sa théorie.

Darwin tenait l'évolution comme un processus lent et graduel requérant de nombreuses générations successives et s'inscrivant donc dans une durée très longue. Il reconnut aussi le rôle de l'isolement des populations dans l'apparition d'espèces distinctes de leurs ancêtres – et pouvant donc conserver de nombreux caractères initiaux, évoluer dans une voie innovante mais aussi disparaître – et resta toujours conscient des nombreuses objections à sa théorie, et notamment de l'absence de fossiles de « transition » entre les organismes vivants témoignant de l'existence d'ancêtres communs à partir desquels ils auraient divergé. De même, il ne connaissait pas le mécanisme de transmission des caractères entre les générations, ni comment certaines caractéristiques nouvelles pouvaient apparaître.

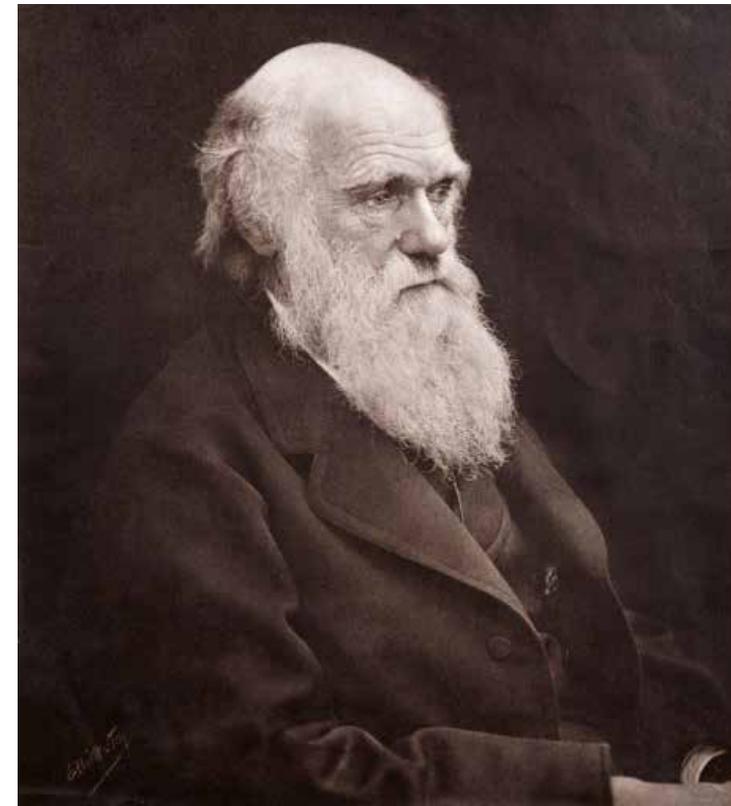
Comme la plupart des autres scientifiques de son époque, Darwin ignorait qu'un moine autrichien réalisant des expériences sur la sélection des pois, Gregor Mendel (1822-1884), avait suggéré en 1866 que les caractères des organismes vivants puissent être contrôlés par des paires de « particules d'hérédité » provenant des deux parents : elles furent connues plus tard comme étant les gènes. En 1900, le botaniste néerlandais Hugo de Vries (1848-1935) réalisa des expérimentations similaires et obtint des résultats identiques – il contribua ainsi à populariser les observations de Mendel. À ce moment, l'étude microscopique des cellules avait déjà révélé l'existence des chromosomes. Dans la décennie qui suivit, le généticien américain Thomas Hunt Morgan (1866-1945) réalisa des expérimentations sur la drosophile pour établir le lien entre ces chromosomes et les « particules d'hérédité » de Mendel. Le mécanisme par lequel les chromosomes échangent et modifient l'information génétique fut découvert dans les années 1930 par une généticienne américaine, Barbara McClintock (1902-1992) : elle montra que, lorsqu'ils s'« enjambent » lors de la méiose, leurs gènes sont recombinaisonnés pour produire de nouveaux traits et diversifier le patrimoine génétique de la descendance.

La molécule chimique porteuse des informations génétiques fut identifiée dans les années 1950 comme étant l'ADN (acide désoxyribonucléique). Une biologiste moléculaire anglaise, Rosalind Franklin (1920-1958), obtint en 1953 par diffractométrie aux rayons X des images de très grande qualité de cette molécule qui furent exploitées par deux biologistes, l'Américain James D. Watson (né en 1928) et l'Anglais Francis H. Crick (1916-2004). Ils découvrirent que l'ADN était constitué d'une double hélice composée de deux brins entrelacés formés par l'enchaînement de sous-unités appelées « bases » portant l'information génétique sous forme d'un code chimique. Lorsque la cellule se divise, cette double hélice est déliée et chacune de ses moitiés forme alors un « patron » permettant de construire une nouvelle molécule identique. Cela explique comment l'information génétique est transmise de cellule en cellule dans un organisme, mais aussi, par les gamètes sexuels (ovule et spermatozoïde), à la génération suivante lors de la reproduction.

Une modification ou mutation dans le processus de copie (transcription) peut altérer un gène et c'est ainsi que de nouveaux caractères apparaissent. Dans les années 1960, ces travaux confortèrent l'hypothèse de Darwin : ils constituent les bases de la théorie moderne de l'évolution.

La génétique eut aussi une importance essentielle dans le développement de la théorie de l'« horloge moléculaire ». En 1967, deux biochimistes américains, Allan Wilson (1934-1991) et Vincent Sarich (1934-2012), montrèrent qu'il était possible d'estimer la durée de l'évolution entre les primates et l'homme en étudiant l'ultrastructure de certaines protéines, puis celle de l'ADN. Une fois qu'une espèce en a donné une deuxième à la suite de l'accumulation progressive de modifications génétiques liées aux erreurs de transcription, les structures de ces molécules divergent. Cette divergence sera d'autant plus marquée que les deux espèces se seront séparées plus longtemps auparavant. Wilson et Sarich estimèrent que la divergence entre l'homme et son plus proche cousin vivant, le chimpanzé, avait eu lieu il y a 4 à 6 millions d'années et était donc bien plus proche de notre époque que ne le suggéraient les fossiles. Leur travail fut l'objet d'une vive controverse portant sur le rythme des « tic-tac » de l'horloge moléculaire et sur le fait de savoir si elle pouvait parfois accélérer ou ralentir. Les estimations actuelles reposent donc sur les apports conjoints des fossiles, de l'étude des ADN, des caractères anatomiques et d'autres informations encore.

L'entomologiste allemand Willi Henning (1913-1976) développa quant à lui une approche différente de la classification biologique traditionnelle. Il regroupa les organismes vivants en fonction de synapomorphies, c'est-à-dire de caractères partagés par tous les membres d'un groupe, propres à celui-ci et hérités d'un ancêtre commun : cet ensemble cohérent forme un « clade ». Son analyse cladistique, conçue pour reconstituer l'évolution des divers groupes, fonda



◀ Pour le naturaliste et géologue anglais Charles Darwin, les diverses espèces descendent d'ancêtres communs et l'apparition d'espèces nouvelles résulte d'une sélection naturelle conditionnée par des facteurs environnementaux.



▲ Cette représentation modélisée de l'ADN (acide désoxyribonucléique) révèle sa structure en double hélice. Lorsqu'il se réplique, les « barreaux » de l'« échelle » se rompent en leur milieu. Chacune des deux moitiés constitue un modèle pour la formation d'une nouvelle double hélice identique à la première.

la classification dite « phylogénétique ». Se prêtant à l'analyse informatisée, elle livre des arbres illustrant les relations entre les groupes : les dendrogrammes, ou cladogrammes (voir page 91). Ils révèlent des parentés, mais n'incluent pas la dimension temporelle permettant de préciser le moment des divergences. De plus, ils sont souvent arrangés par souci de simplification et certains niveaux de divergence y sont parfois négligés.

L'extinction est le phénomène inverse de la spéciation (apparition d'une espèce) : plus de 99 % des espèces un jour apparues sont éteintes. L'évolution favorise l'adaptation à des conditions environnementales soumises à de nombreux changements : modifications climatologiques, tellurisme et volcanisme, dérive des continents, etc. De plus, les organismes vivant en association avec une ou des espèce(s) donnée(s) (proies, compétiteurs, prédateurs, parasites, pathogènes, etc.) évoluent aussi avec celles-ci. Dans cette course vers la meilleure adaptation, certaines espèces ressortent gagnantes, d'autres perdantes. Par exemple, une espèce peut arriver sur un nouvel archipel, riche en ressources alimentaires et dépourvu de prédateurs, et coloniser les îles qui se singularisent chacune par de petites différences environnementales. Chaque groupe s'adapte rapidement à l'île où il s'est installé par radiation adaptative (« explosion radiative ») et y forme une espèce nouvelle (la compréhension de ce processus permit à Darwin, lors de son passage aux Galápagos, d'imaginer sa théorie sur l'évolution). Si une nouvelle espèce arrive, elle peut entrer en compétition avec celles en place – d'où leur possible extinction –, puis subir elle aussi une radiation adaptative... et ainsi de suite.

La théorie actuelle de l'évolution s'applique à plusieurs situations. La sélection sexuelle en constitue un exemple particulier : elle explique l'apparition de caractères propres à un sexe (généralement le mâle) qui attirent l'autre sexe en témoignant indirectement d'une forme physique et d'une fertilité avantageuses, comme l'illustrent les bois massifs du cerf géant, aujourd'hui éteint, ou le plumage flamboyant de l'oiseau de paradis, encore vivant. Ces caractères sexuels deviennent parfois extrêmes au point d'affecter la survie de l'espèce.

La « convergence évolutive » se traduit, elle, par l'apparition de caractères similaires chez des organismes très différents, en raison souvent de modes de vie analogues ou d'un environnement les soumettant aux mêmes contraintes.

Par exemple, les oiseaux, les chauves-souris et les ptérosaures (éteints, voir pages 288 à 291) ont des ailes à première vue ressemblantes – formées à partir des membres antérieurs et mues par des muscles puissants –, mais qui n'en ont pas moins une anatomie interne dissemblable. L'aile de la chauve-souris est soutenue par les doigts 3 à 5, celle du ptérosaure par le doigt 4 et celle de l'oiseau, ayant des os très réduits, doit tout au développement des plumes. L'évolution s'est donc accompagnée d'une « convergence » dans la forme des ailes pour remplir un même rôle : le vol.

Autre exemple : l'exaptation. Parfois appelée préadaptation, elle traduit une adaptation opportuniste, exploitant des caractères utiles à une nouvelle fonction pour laquelle ils n'avaient pas été initialement sélectionnés. Ainsi, il est probable que les premières plumes apparues chez certains dinosaures participaient à la thermorégulation ou avaient un rôle d'affichage visuel, puis qu'elles servirent au vol, dans un second temps, chez les oiseaux, leurs descendants.

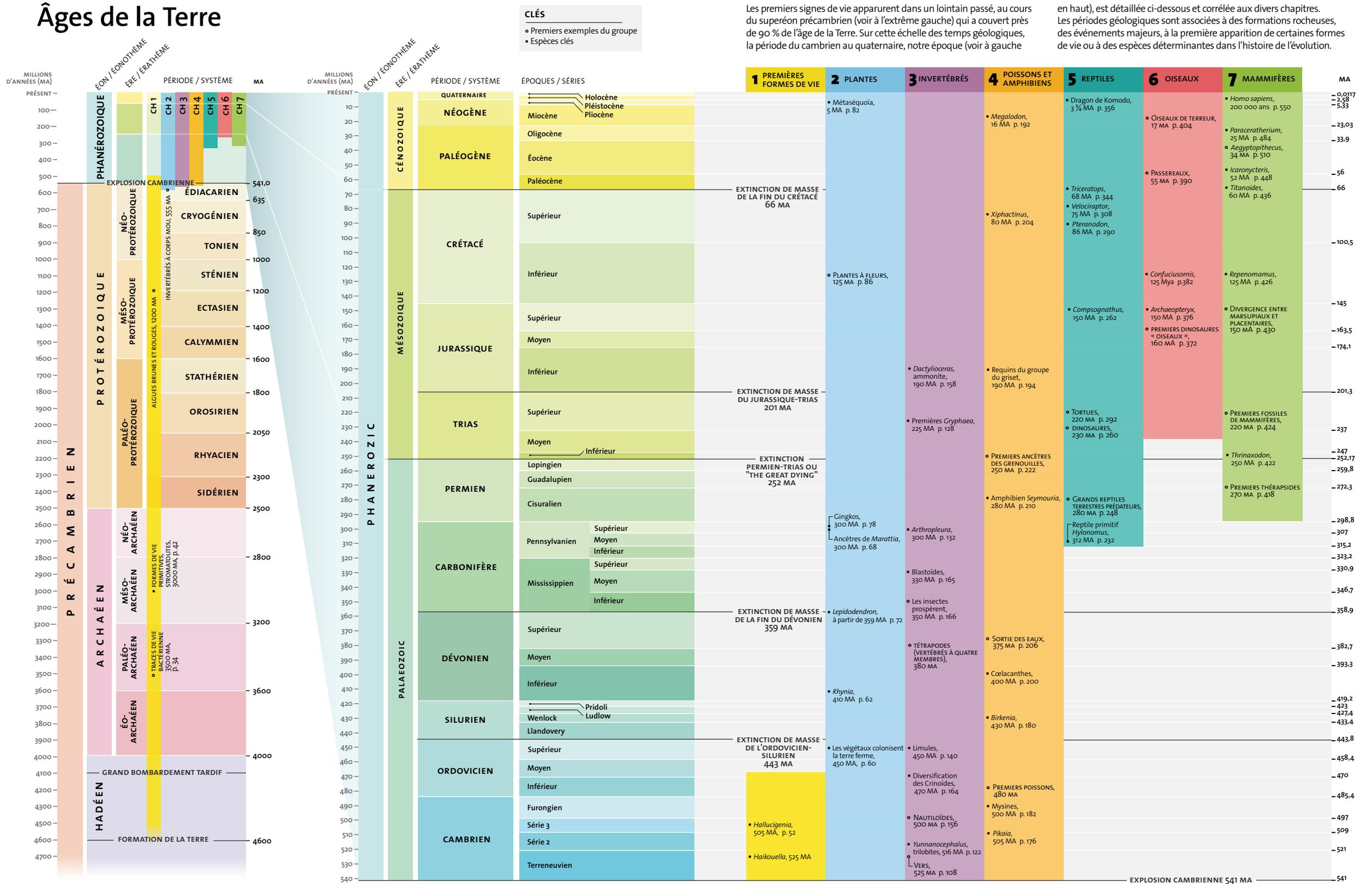
Les connaissances sur l'évolution changent en permanence, tout comme les espèces. Les études génétiques, l'analyse moléculaire et le séquençage de l'ADN, des techniques qui n'en sont qu'à leurs balbutiements, se révèlent prometteurs. La cladistique tend à se substituer à la classification linnéenne traditionnelle. Cette « bibliothèque de la vie » que constituent les collections de fossiles ne cesse de s'étoffer et le réexamen de spécimens déjà connus permet d'en revisiter l'interprétation, parfois révolutionnée par des technologies de pointe empruntant à la microscopie, aux techniques d'extraction, à l'analyse radio-isotopique, à l'imagerie radiographique et à la tomographie.

Cet ouvrage interroge sur le sens même de ce savoir. Les progrès des connaissances font de l'évolution l'un des attributs les plus essentiels à la vie, ayant façonné l'histoire entière de notre planète. Une meilleure compréhension de ce processus nous aidera à imaginer vers quel avenir la nature entière et nous-mêmes nous dirigeons, dans un contexte dominé par le réchauffement climatique, la pollution, le productivisme alimentaire et la survenue d'épidémies ; elle pourrait également limiter, au moins partiellement, les extinctions, comme l'illustre la saga du quagga (voir page 558) ayant permis de recréer par élevage sélectif un animal tenu comme disparu depuis plus d'un siècle.

▼ À l'instar du cerf géant aujourd'hui éteint, le wapiti (*Cervus canadensis*) développe des bois de très grande taille ayant un rôle avant tout sexuel. Durant la période de rut, le mâle se livre à des comportements ritualisés destinés à dominer ses rivaux et à attirer les femelles : il adopte des postures spécifiques d'intimidation, combat avec ses bois et émet des vocalisations particulières : le brame.

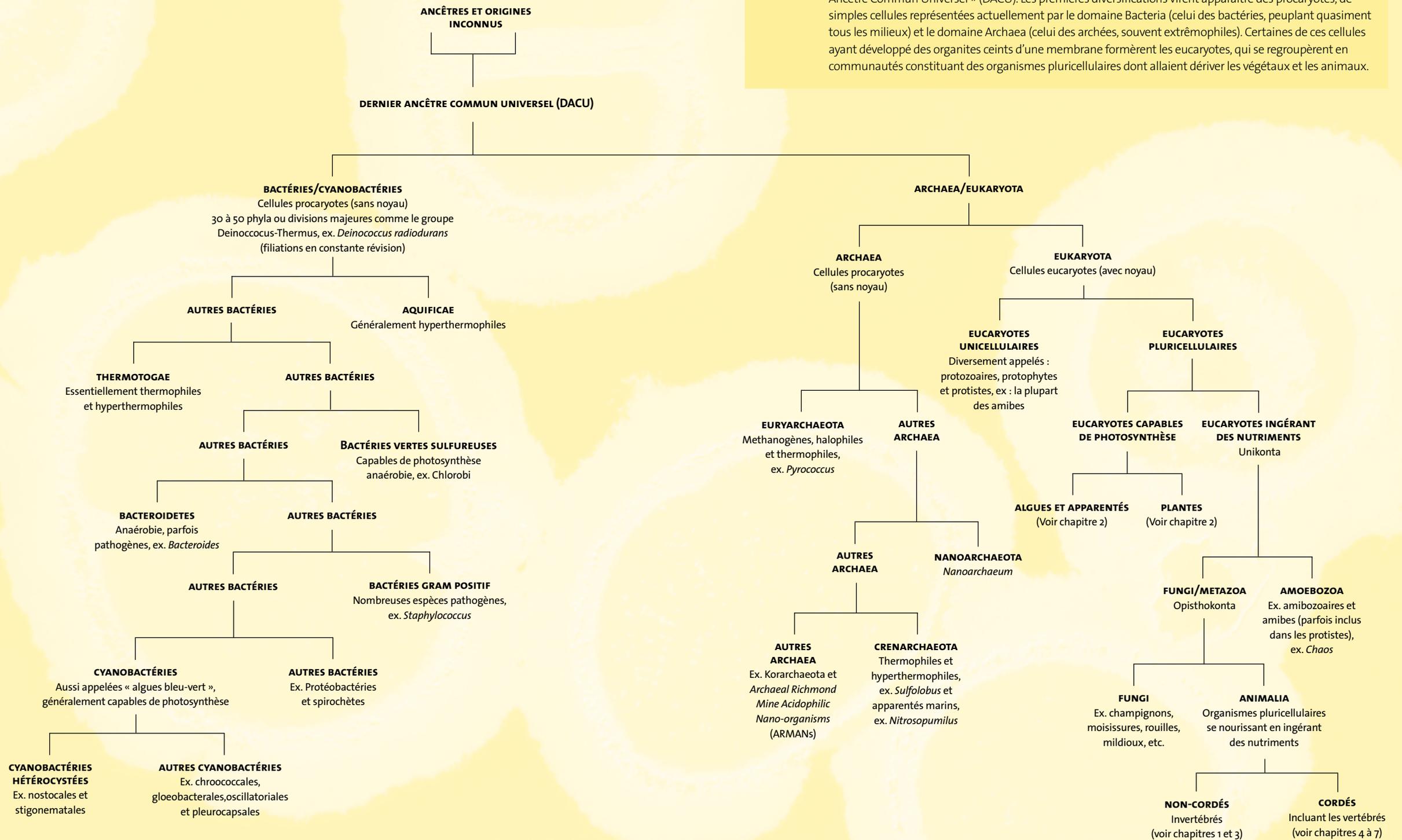


Âges de la Terre



1 | PREMIÈRES FORMES DE VIE

Il est reconnu que toutes les formes de vie ont évolué à partir d'un micro-organisme, souvent appelé « Dernier Ancêtre Commun Universel » (DACU). Les premières diversifications virent apparaître des procaryotes, de simples cellules représentées actuellement par le domaine Bacteria (celui des bactéries, peuplant quasiment tous les milieux) et le domaine Archaea (celui des archées, souvent extrémophiles). Certaines de ces cellules ayant développé des organites ceints d'une membrane formèrent les eucaryotes, qui se regroupèrent en communautés constituant des organismes pluricellulaires dont allaient dériver les végétaux et les animaux.



RETRACER LES TEMPS PRÉHISTORIQUES



- 1 Couches sédimentaires formant la totalité de la strate jurassique, exposées dans un fjord de Norvège.
- 2 Nicolas Sténon compara les dents de requins fossiles à celles d'espèces actuelles.
- 3 Il fallut des milliards d'années pour que l'érosion livre une telle sculpture, ici dans les roches jurassiques de la réserve du Torcal de Antequera (Espagne).

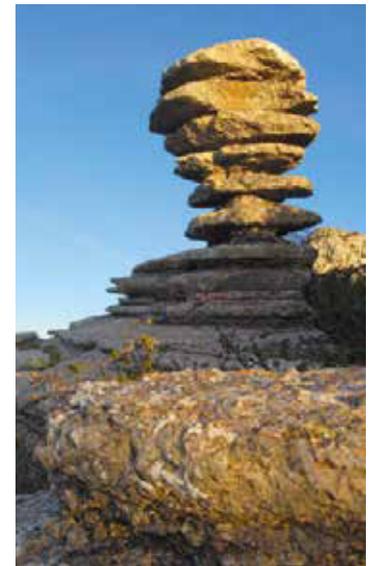
La plupart des civilisations ont leur propre version des événements survenus au cours de la période ayant précédé l'histoire, dite préhistorique, un âge qu'elles peuplent souvent de divinités, d'esprits et de créatures mythiques. À partir du ^{xv^e} siècle, la remise en question des dogmes amena certains esprits curieux à s'interroger sur ces approches traditionnelles. L'âge de la Terre fit débat au sein de la communauté scientifique et l'accumulation progressive d'observations les convainquit que la planète était plus ancienne qu'imaginé jusqu'alors, imposant la conception d'une échelle des temps à sa mesure. De nos jours, la Charte internationale chronostratigraphique est communément tenue comme la référence en la matière : elle est actualisée par la Commission internationale de stratigraphie, un sous-comité de l'Union internationale des sciences géologiques. Cette charte en constant remaniement est périodiquement revisitée pour appliquer les dernières découvertes stratigraphiques à des domaines tels que la géologie, la paléontologie ou les sciences de l'évolution. Sa plus grande division chronostratigraphique est l'éon (au cours duquel un éonothème de roche est formé), subdivisé en ères (éraithèmes), périodes (systèmes, voir page 20), époques (séries) et âges (étages).

Des siècles durant, les fossiles de végétaux ou d'animaux furent tenus pour des productions rocheuses naturelles, ayant une origine physique. Ils passaient

pour être « apparus » sans relation à des formes de vie, un peu comme les nodules de silex, les pierres précieuses, les veines minérales ou les pépites d'or et d'argent. Dérivé du latin signifiant « extrait de la terre », le mot « fossile » désignait à l'origine tout objet trouvé dans le sol : pour certains, les fossiles étaient tombés du ciel, de la Lune ou des étoiles ou avaient simplement été placés dans les roches par les dieux pour prouver leur puissance, voire pour tromper les non-croyants.

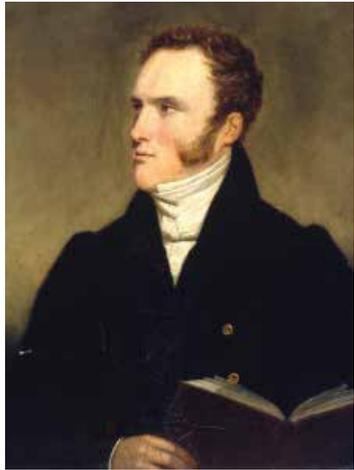
Le géologue danois Nicolas Sténon (1638-1686) se demanda comment un fossile pouvait être inclus dans une roche : ce fut l'objet d'un opuscule sur les « solides contenus naturellement dans un solide » (1669). Ayant reconnu la ressemblance des fossiles avec des organismes vivants, dont, notamment, les dents de requins (voir image 2), il se demanda s'ils n'avaient pas précisément pour origine ces organismes. D'autres scientifiques s'interrogèrent sur cette question à la même époque. En 1692, le naturaliste anglais John Ray (1627-1705) écrivit : « Ces [fossiles] étaient à l'origine les coquilles et les os de poissons et d'autres animaux vivant dans la mer. » Robert Hooke (1635-1703), un libre-penseur, avait une opinion similaire : les objets fossilisés comme les ammonites ou le bois avaient pour origine un matériel biologique pétrifié par des eaux fortement minéralisées. Sténon étendit ses observations aux roches contenant les fossiles et s'intéressa à leur formation. Il fut l'un des fondateurs de la stratigraphie, une branche de la géologie qui étudie les couches ou stratifications des roches, notamment celles d'origine sédimentaire (voir image 1) ou volcanique. Dans les années 1660, il formula trois principes de stratigraphie aujourd'hui évidents mais révolutionnaires pour l'époque. Tout d'abord, sa loi de superposition voulait que les couches les plus profondes soient les plus anciennes et soient recouvertes par des couches de plus en plus récentes, le tout formant donc une séquence chronologique. Deuxièmement, le principe de l'horizontalité primaire postulait que les couches, formées du fait de la gravité, soient originellement planes et horizontales : les modifications dans leur inclinaison ou leur forme résultent de mouvements terrestres. Enfin, le principe de la continuité latérale décrivait comment elles s'étendaient dans toutes les directions lorsqu'elles se formaient : si des couches similaires étaient disjointes par des vallées d'érosion, fragmentées par des événements telluriques ou divisées par des volcans, elles n'en étaient pas moins initialement continues.

Dans les années 1780, le géologue écossais James Hutton (1726-1797) développa quant à lui le principe de l'uniformitarisme. Il postula que les processus et événements observés dans la nature, comme l'érosion par le vent (voir image 3), par la glace ou par les vagues, ainsi que la transformation des couches sédimentaires en roches avaient toujours existé et avaient modelé la Terre à travers les âges : « Le présent est la clé du passé. » Vers 1830, le géologue britannique Charles Lyell (1797-1875, voir image 4 et page 233) popularisa l'uniformitarisme dans ses *Principes de géologie*, sous-titrés : « Une tentative d'expliquer les changements de la surface de la Terre par des causes opérant



ÉVÉNEMENTS CLÉS

- 2 750 ans	50-100	325	1650	1669	1779	années 1860	1900	1907	années 1920	1974	2006
En se référant au règne de souverains mythiques, les Babyloniens positionnent le début du monde à diverses époques – dont certaines remontant à 400 000 ans.	Pour les lettrés chinois de la dynastie Han, le cosmos entier est détruit puis recréé tous les 23,5 millions d'années.	Se basant sur d'anciennes légendes, l'historien romain Eusèbe de Césarée fait remonter la création de la Terre à 30 000 ans.	L'étude de la Genèse suggère à l'archevêque anglican James Ussher que la Terre a été créée en octobre 4004 av. J.-C.	Nicolas Sténon (1638-1686) formule trois principes géologiques majeurs, dont la loi de superposition et le principe de l'horizontalité originelle.	Buffon (1707-1788) crée des sphères métalliques représentant la Terre en miniature, calcule le temps qu'elles mettent à se refroidir une fois chauffées et en déduit que la planète a 75 000 ans.	William Thomson (1824-1907) estime l'âge de la Terre compris entre 20 et 400 millions d'années ; il affina plus tard cette estimation à 40 millions d'années.	La plupart des scientifiques conviennent, se fiant à l'avis des physiciens, que la Terre a environ 100 millions d'années. Certains géologues affirment qu'elle est bien plus âgée.	Bertram Bollwood (1870-1927) publie son étude sur la datation des minéraux par désintégration radioactive (comme celle transformant l'uranium en plomb).	Les techniques de datation radiométrique font remonter l'âge de la Terre à quelques milliards, et non plus à quelques millions, d'années.	La Commission internationale de stratigraphie lance un projet d'envergure pour produire une échelle des temps géologiques globale.	Le tertiaire est remplacé par le paléogène et le néogène, ce qui nécessite d'ajuster la limite inférieure du quaternaire.



actuellement » et estima la planète bien plus ancienne qu'alors imaginé, passant de quelques milliers à plusieurs millions d'années. Le naturaliste français Georges Cuvier (1769-1832) ouvrit la voie à la notion d'extinction jusqu'alors récusée par la plupart des croyants. Publié en 1821, son essai *Théorie de la Terre* fait des fossiles les vestiges de créatures ayant vécu il y a très longtemps, disparues lors de cataclysmes d'échelle biblique – telles des inondations – : il ne faisait aucunement référence à l'évolution. Progressivement donc, il fut acquis que les temps géologiques étaient extrêmement longs, que les fossiles étaient les restes d'anciens organismes vivants et que l'immense période des temps préhistoriques devait être organisée sous forme d'une table chronologique.

À cette même époque, des géologues européens repéraient et nommaient les diverses couches et leurs fossiles caractéristiques. Leur travail était directement associé aux grands projets de l'ère industrielle : constructions de canaux et de barrages, recherche de gisements de charbon et d'autres minéraux, et, à partir de 1830, développement du réseau ferré. En 1822, deux Anglais, William Conybeare (1787-1857), un vicaire également géologue, et le minéralogiste William Phillips (1775-1828), publièrent *Outlines of the Geology of England and Wales*, traité dans lequel apparut pour la première fois le terme « carbonifère », faisant référence aux couches épaisses contenant du charbon (du latin *carbo*, « charbon »). Le carbonifère fut ainsi la première période géologique dotée d'un nom. Cette même année, le géologue belge Jean d'Omalius d'Halloy (1783-1875, voir image 5) nomma des couches particulières des environs de Paris « crétacé » (du latin *creta*, « craie »). Le nom de « jurassique » fut proposé quelques années plus tard, en 1829, par le géologue et chimiste français Alexandre Brogniart (1770-1847) pour nommer les couches calcaires du Jura.

Au début des années 1830, le géologue anglais Adam Sedgwick (1785-1873) – qui avait été en 1831 un des tuteurs du jeune Charles Darwin (1809-1882) – et le géologue écossais Roderick Murchison (1792-1871) travaillaient au pays de Galles. Murchison découvrit des roches renfermant des fossiles de poissons mais surtout de trilobites et de brachiopodes. Il nomma cette couche « silurien », par référence aux Silures, un peuple celte qui vivait dans la région sous l'ancienne Rome. Sedgwick identifia un autre ensemble de roches et de fossiles déposés avant le silurien et le nomma « cambrien » (Cambria faisant référence au pays de Galles). Tous deux formalisèrent ces couches dans une publication de 1835. Le « trias » fut introduit par l'Allemand Friedrich von Alberti (1795-1878) pour distinguer trois couches toujours associées dans le nord-ouest de l'Europe (« trias » signifie donc « trois ») : des grès rouges et bigarrés surmontés de couches crayeuses, elles-mêmes dominées par des argiles noires. Quelques années plus tard, en 1839, Sedgwick et Murchison proposèrent le nom de « dévonien » pour distinguer un système étudié dans le comté du Devon, au sud-ouest du pays de Galles ; l'année suivante, Murchison définit le « permien » sur la base de roches provenant de la région de Perm, en Russie. En 1879, le géologue anglais Charles Lapworth (1842-1920) créa le nom d'« ordovicien » en référence au peuple celte des Ordovices : il mit ainsi un terme à l'ambiguïté du positionnement de certaines couches des Galles du Nord que des géologues avaient incluses dans le cambrien, la période précédente, et d'autres dans le silurien, la suivante.

Le nom de « tertiaire » date quant à lui de 1759, lorsque le géologue italien Giovanni Arduino (1714-1795), étudiant des affleurements en Toscane, suggéra que les temps préhistoriques pouvaient être divisés en quatre grandes périodes : primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. En 1828, Charles Lyell introduisit le terme dans sa nouvelle chronologie et le subdivisa en pliocène, miocène et éocène (qui désignent désormais des époques) selon la nature des fossiles retrouvés dans les couches. De nombreuses autres appellations furent proposées par les pionniers de la géologie et il fallut attendre quelques décennies avant qu'une terminologie



basique ne soit validée. Par exemple, aux États-Unis, des couches qualifièrent les séries du « mississippien » et du « pennsylvanien », correspondant en fait respectivement au carbonifère inférieur et supérieur d'Europe.

La Charte internationale chronostratigraphique est elle-même un outil en évolution. Il sembla dans les années 1980 que le tertiaire ne puisse être défini avec autant de précision que les autres périodes et, au cours des années 2000, des géologues proposèrent de le scinder en deux entités : le paléogène et le néogène. Cette modification remit en question le quaternaire, tel que défini par Arduino en 1759. Cette époque n'eut plus qu'un statut informel mais, avec l'augmentation des données et des fossiles retrouvés partout autour du monde, le quaternaire fut redéfini en 2009 comme la période suivant le néogène et commençant il y a environ 2,58 millions d'années (et non plus 1,8 million d'années) pour s'étendre jusqu'à nos jours.

La généralisation des principes de stratigraphie de Sténon permit entre 1900 et 1920 de valider une chronologie des diverses périodes et d'établir des cartes géologiques plus fiables (voir image 6), fondées sur la comparaison de diverses roches et de leurs fossiles et reposant sur l'identification de fossiles stratigraphiques (voir page 159). Restait vive, en revanche, la question de la datation relative ou absolue (en millions d'années) de ces périodes. Elle reposait à l'origine sur l'estimation du temps de dépôt et de consolidation des particules sédimentaires formant la roche. Il fut possible de recourir à des mesures de datation radiométrique dès 1907 (voir page 25), puis des avancées techniques permirent d'affiner les mesures. En 2004, la première période nouvelle découverte depuis plus de 120 ans fut ainsi validée : l'édicarien. S'étageant de 635 à 541 millions d'années, elle fut nommée en référence à des fossiles provenant des collines d'Ediacara, en Australie méridionale (voir page 46). Plus récemment, le super-éon précambrien fut revisité et scindé en une série de trois périodes (voir page 20). **SP**

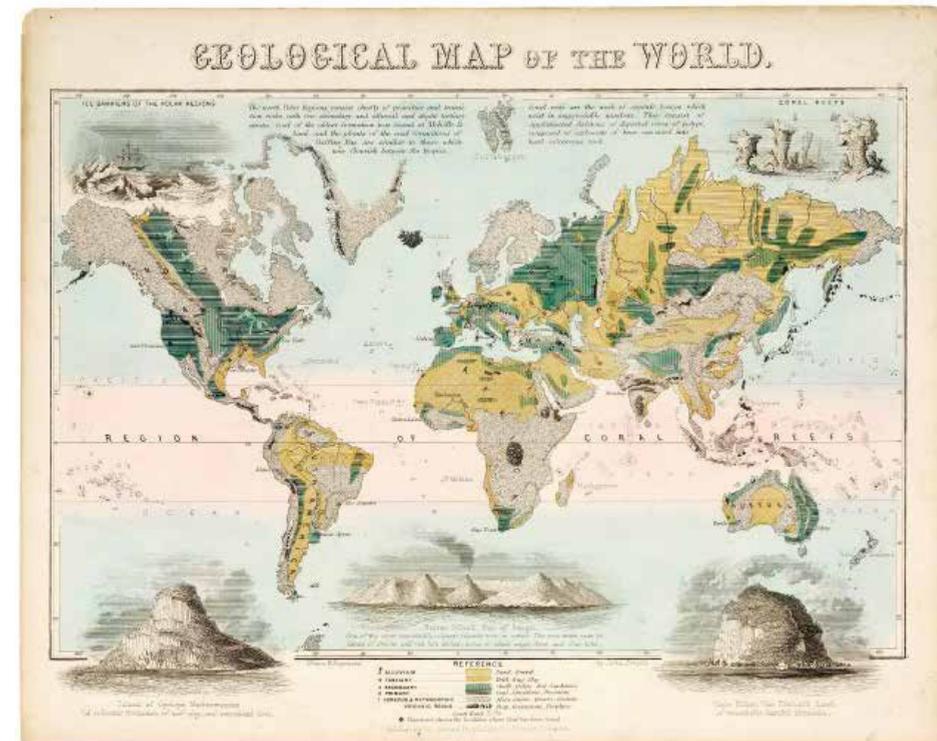
4
5

6

4 Charles Lyell fut le père de l'uniformitarisme, un concept largement utilisé par la suite, y compris pour traiter l'évolution de l'Univers.

5 Jean d'Omalius d'Halloy cartographia les couches du crétacé en France. Charles Darwin reconnut en lui l'un des pères du transformisme.

6 Si les relevés géologiques ont considérablement progressé depuis le début du XIX^e siècle, la cartographie repose toujours sur des codes de couleurs, de symboles ou d'ombrage pour localiser les roches de diverses époques.



Comprendre la formation des fossiles

ÉON ARCHÉEN-HOLOCÈNE

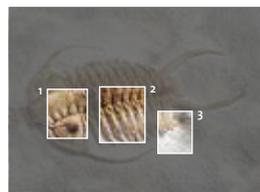


ESPÈCE *Paraceraurus exsul*
GROUPE Phacopida
TAILLE 16 cm
LOCALISATION Russie

Plus que beaux et fascinants, des fossiles comme celui de ce trilobite constituent un témoignage inestimable sur l'évolution de la vie sur Terre. Même si tout fossile est un vestige d'un organisme vivant préservé, le plus souvent incorporé dans une roche, il n'en demeure pas moins vrai que la matière organique qui le composait, comme celle d'os ou d'écorces, est remplacée par des minéraux : cela signifie que l'os ou l'écorce originels ont disparu mais que leur forme a été conservée. La fossilisation requiert une très longue période, souvent des millions d'années, et, par convention, remonte à plus de 10 000 ans.

La plupart des fossiles sont constitués d'organes durs (racines, écorces, cônes, graines, nervures des feuilles, grains de pollen pour les végétaux ; coquilles, dents, os, cornes, griffes et épines pour les animaux) qui résistent mieux aux animaux charognards, nécrophages ou détritvovores attaquant la matière organique morte mais aussi aux vers, aux champignons et aux bactéries la décomposant totalement. Les fossiles se forment avant tout en milieu aquatique (mers, lacs, rivières ou marais), ce qui explique que les animaux marins, tels que les trilobites ou les ammonites, abondent dans les gisements fossilifères. Le long processus de fossilisation commence lorsque les cadavres sont recouverts de sédiments (sable, limon, boue, ou argile) les protégeant de la décomposition et de la dislocation, puis la pression et la température du milieu augmentent avec les dépôts successifs de sédiments, et, peu à peu, les particules minérales intégrées au fossile et autour de lui (matrice) se consolident et se transforment en roche. Les fossiles sont donc retrouvés dans des roches sédimentaires telles que des grès, des calcaires, des argilites ou des schistes argileux ; les roches ignées (magmatiques), liquéfiées par des températures extrêmes, et les roches métamorphiques, trop altérées par la pression et la température, ne se prêtent pas à leur préservation. **SP**

FOCUS



ZOOMS



1 SUBSTITUTION

Les cristaux minéraux présents dans l'organisme vivant peuvent subsister, croître ou être remplacés par des arrangements cristallins de même nature chimique. Lors de ses mues, le trilobite perdait sa carapace puis grandissait avant que ses téguments ne durcissent : nombre de fossiles sont donc en fait des vestiges de mues et non l'animal entier.



2 PERMINÉRALISATION

Les articulations de l'exosquelette sont visibles. L'eau souterraine qui s'est écoulée sur l'animal enfoui a envahi les espaces remplis par un liquide ou un gaz (parfois au niveau cellulaire) que ses sels minéraux ont comblé en précipitant : cette perminéralisation peut, lorsqu'elle est lente et uniforme, conserver des détails microscopiques comme des cellules et leur contenu.



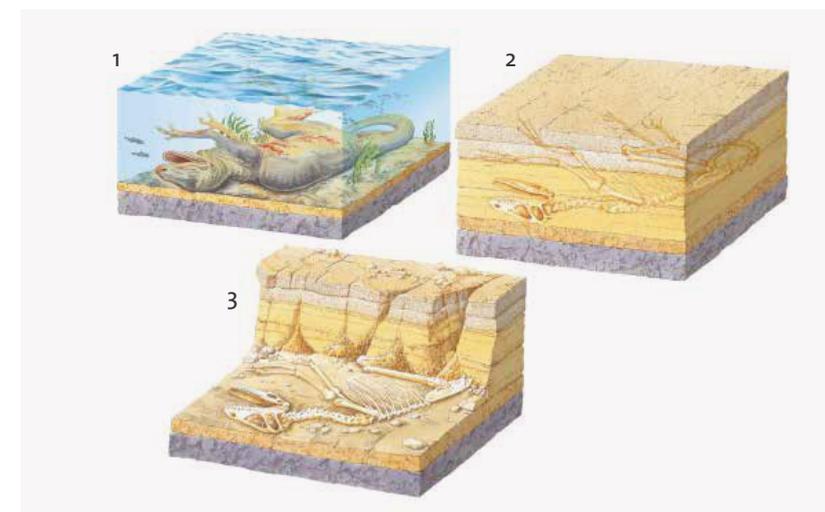
3 MATRICE

La roche extérieure entourant le fossile forme sa matrice. Pouvant être constituée des mêmes minéraux que le fossile, elle lui est souvent similaire par sa texture et sa coloration : dégager le fossile est dans ce cas très délicat. Ce trilobite *Paraceraurus exsul* date de l'ordovicien.



TYPES DE FOSSILES

Si les fossiles ont comme point commun de témoigner d'une forme de vie passée, il en existe divers types. Les fossiles stratigraphiques (voir page 159) sont ceux d'organismes communs, très répandus, évoluant rapidement et constituant des indicateurs d'une époque donnée. Les ichnofossiles témoignent d'activités biologiques fossilisées : empreintes de pas, coprolithes (excréments fossilisés), empreintes d'écorces ou galeries racinaires, etc. Les moules sont les empreintes extérieures de l'organisme restant une fois celui-ci détruit ; ils peuvent être remplis d'autres substances minérales (silice, pyrite, gypse, etc.). Les fossiles dits « en film de carbone » s'obtiennent quand la matière organique est portée à une température et soumise à une pression qui la détruisent, ne laissant subsister que le carbone qu'elle contenait sous forme d'une silhouette noircie (ci-dessus).



◀ Une dégradation minimale du cadavre après la mort (1) suivie par sa disparition rapide sous des sédiments constitue la clé de la réussite d'une bonne fossilisation. Des sédiments continuent à s'accumuler, et ses restes sont enfouis de plus en plus profondément (2). L'augmentation de pression et de température et la percolation lente d'eaux souterraines riches en sels minéraux parachèvent le processus. Des mouvements géologiques et l'érosion finissent parfois par exposer le fossile en surface (3).

DATER LES ROCHES ET LES FOSSILES



- 1
- 2
- 3

- 1 La datation potassium-argon au moyen d'un four à induction constitue l'une des techniques de datation des roches par analyse de leur teneur relative en isotopes radioactifs (K et Ar) créés par les rayons cosmiques.
- 2 Henri Becquerel reçut le prix Nobel en 1903 pour avoir découvert la radioactivité naturelle. Il le partagea avec Pierre et Marie Curie.
- 3 En se désintégrant, le noyau d'un atome d'uranium libère des isotopes de masse inférieure.

Des siècles durant, la tradition voulut que plus on s'enfonçait dans le sol, plus on remontait le temps : les roches les plus profondes étaient donc les plus anciennes. L'anatomiste et géologue danois Nicolas Sténon (1638-1686) en fit l'un de ses postulats : celui de la loi de superposition voulant que dans une série de couches ou de strates, les plus anciennes soient les plus profondes (voir pages 24 et 25). Les géologues et paléontologues comprirent alors comment la présence de certains types de roches contenant des fossiles spécifiques (dits stratigraphiques, voir page 159) pouvait permettre de déterminer ou comparer les âges relatifs des strates et d'autres fossiles qu'elles contenaient.

Le géologue anglais William Smith (1769-1839) fut l'un des premiers à corrélérer de telles informations. Ingénieur en charge de mines et de la construction de canaux, il releva la nature des roches et de leurs fossiles sur des régions étendues et établit en 1815 une carte géologique de l'Angleterre, du pays de Galles et d'une partie de l'Écosse – ce fut la première carte couvrant un pays. Avant lui, en 1809, le géologue américain William Maclure (1763-1840) avait publié une carte similaire mais ne couvrant que des zones de l'est et du sud-est de l'Amérique du Nord.

De nombreux relevés suivirent ceux de Smith, notamment en France, en Allemagne et dans d'autres pays européens : ces informations facilitèrent

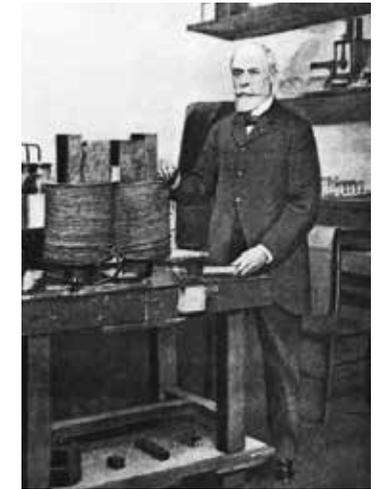
la datation relative ou comparative des couches au XIX^e siècle. Pour autant, il restait impossible de dater la formation d'un fossile en valeur absolue, que ce soit en milliers ou en millions d'années. Cette opération ne fut possible qu'à la fin du siècle. En 1896, le physicien français Henri Becquerel (1852-1908, voir image 2) découvrit la radioactivité, prélude à des travaux sur la nature et la matière constitutive des atomes et sur leur instabilité. Ces derniers émettent de la radioactivité sous forme de rayons et de particules et, ce faisant, changent de nature chimique. Par exemple, l'uranium, spontanément radioactif, se dégrade, étape par étape, en passant par divers éléments, jusqu'à livrer un élément stable : le plomb. Dans un échantillon minéral contenant de l'uranium, comme le zircon, la moitié de l'uranium U₂₃₈ se désintègre en plomb Pb₂₀₆ en 4 470 millions d'années. La moitié d'une autre forme d'uranium, U₂₃₅, se désintègre en plomb Pb₂₀₇ en 704 millions d'années. Ces périodes, appelées les demi-vies de la série de l'uranium (voir image 3), représentent le tic-tac d'une horloge grâce à laquelle il est possible de mesurer l'âge de la formation d'un échantillon minéral en y quantifiant la proportion des divers isotopes d'uranium, de plomb et d'autres éléments.

Vers 1905, le physicien néo-zélando-britannique Ernest Rutherford (1871-1937) proposa de recourir à la décroissance radioactive pour dater l'âge de la Terre. L'un de ses étudiants, le chimiste américain Bertram Boltwood (1870-1927) avança en 1907 un âge compris entre 400 et 2 000 millions d'années : c'était là des valeurs beaucoup plus importantes que les quelques dizaines de millions d'années fixées jusqu'alors.

La datation radiométrique uranium-plomb (voir image 1), première technique permettant de calculer un âge absolu, reste encore largement utilisée et convient idéalement à des datations comprises entre 4 500 et 1 million d'années avec une précision de l'ordre de 1 %.

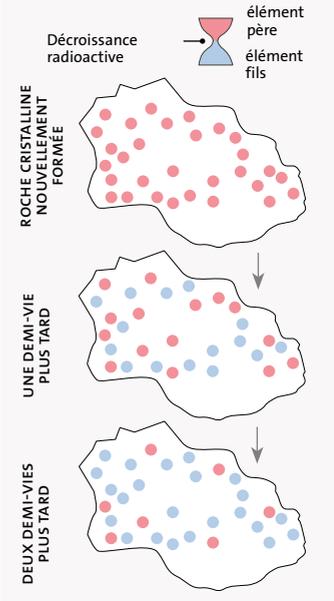
La datation au carbone 14, reposant sur la désintégration du carbone C₁₄ en carbone C₁₂, permet, elle, de dater des échantillons beaucoup plus récents. Le carbone est un élément essentiel à la vie : il est capté par les plantes sous forme de dioxyde de carbone pour entrer dans la chaîne de photosynthèse. Cette technique est particulièrement intéressante pour des organismes jadis vivants, qu'il s'agisse du bois, des os, de la fourrure, des cornes ou des coquilles.

Il est parfois impossible, vu la nature des minéraux constitutifs d'un fossile ou d'une roche, d'en réaliser une datation radiométrique : c'est même rarement envisageable s'agissant des fossiles et des roches sédimentaires où ils se forment. La datation des couches juste supérieures ou inférieures peut fournir une estimation, notamment s'il s'agit de roches ignées refroidies à partir de lave en fusion en piégeant des sels minéraux. Une combinaison entre datation comparative et relative et datation radiométrique mais aussi le recours à la technique de l'horloge moléculaire (voir page 17) constituent désormais le pivot de la connaissance des formes de vie préhistoriques, de la cinétique de transformation des organismes et des processus à l'œuvre dans l'évolution du vivant. **SP**



DATATION RADIOMÉTRIQUE DES ROCHES

- URANIUM (U) instable (élément père)
- PLOMB (Pb) stable (élément fils)



ÉVÉNEMENTS CLÉS

1809	1815	1896	1904-1905	1907	1927	1938	1948	1949	1953	1992-1994	2003
William Maclure publie ses <i>Observations on the Geology of the United States explanatory of a Geological Map</i> .	William Smith réalise la première carte géologique d'Angleterre, du pays de Galles et d'une partie de l'Écosse, avec des conventions de coloration correspondant aux âges des roches.	Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle des composés contenant de l'uranium.	Ernest Rutherford suggère d'utiliser la désintégration radioactive pour évaluer l'âge de la Terre, jusqu'alors estimé à 40 millions d'années au maximum.	Bertram Boltwood prouve grâce à une datation uranium-plomb que l'âge de la Terre pourrait remonter jusqu'à 2 milliards d'années.	Le géologue anglais Arthur Holmes (1890-1965) réévalue l'analyse de Boltwood et repousse l'âge de la planète à 3 milliards d'années.	Une équipe de chimistes allemands développe une technique de datation rubidium-strontium. L'isotope Rb87 du rubidium a une demi-vie de 48,75 milliards d'années.	La découverte de la chaîne de désintégration potassium-argon amène rapidement au développement de la datation radiométrique potassium-argon.	Willard Libby (1908-1980) et son équipe, à l'université de Chicago, développent la technique de datation au radiocarbone, qui permet des progrès considérables en archéologie.	La datation uranium-plomb de fragments de la météorite Canyon Diablo, retrouvés en Arizona, fait remonter l'âge de la terre à 4 550 millions d'années – âge assez proche des valeurs actuelles.	Des scientifiques de l'université de Californie réalisent une datation argon-argon de l'enfant de Mojokerto (<i>Homo erectus</i>) : il vivait il y a 1,75 million d'années, plus anciennement qu'imaginé.	La datation de l'enfant de Mojokerto est ramenée à 1,5 million d'années, soulignant l'importance d'une sélection correcte des échantillons testés.

Grand Canyon

ÈRE PALÉOPROTÉROZOÏQUE-DÉBUT DU TRIAS



LOCALISATION Arizona

(États-Unis)

ÂGE 1 850 à 250 millions d'années

GÉOLOGIE Calcaires et grès

L'une des premières merveilles naturelles est sûrement le Grand Canyon, en Arizona, avec ses quelque 440 km de longueur et sa largeur dépassant parfois 25 km. Hautes de 1 830 m par endroits, ses falaises érodées, presque verticales, témoignent de plus d'un tiers de l'histoire de la Terre. Ces roches essentiellement sédimentaires contiennent des myriades de fossiles permettant de suivre l'évolution des végétaux et des animaux sur une très longue période. Pour anciennes qu'elles soient, les couches sont encore presque horizontales et intactes en raison de l'absence de mouvements tectoniques dans cette région.

Le Grand Canyon a fait l'objet de datations tant relatives qu'absolues. Les roches les plus vieilles datent de l'ère paléoprotérozoïque, il y a 1 800 millions d'années. Jusqu'au XXI^e siècle, on imaginait que le canyon avait subi son érosion entre 6 et 1 million d'années, exposant trois couches. Au plus profond des gorges, la séquence de Vishnu (*Vishnu Basement Rocks*) date de 1 850 à 1 250 millions d'années. Elle est surmontée par celle dite « Supergroupe du Grand Canyon », qui affleure en surface par endroits, avec des roches de 1 250 à 650 millions d'années. Cette séquence est surmontée de couches du paléozoïque, plus récentes. En 2008, une datation radiométrique par thermochronologie a prouvé que le canyon avait subi une érosion antérieure, il y a peut-être plus de 50 millions d'années. La thermochronologie, méthode de reconstitution de l'histoire thermique et des mouvements verticaux des roches, repose sur l'observation de l'effacement progressif de défauts cristallins de l'apatite exposée à l'érosion, par fission des atomes d'uranium et de thorium. La même technique a permis en 2012 de repousser à 70 millions d'années les débuts de l'érosion du canyon, ce qui signifie que les grands dinosaures purent en être contemporains. Une étude de 2014 propose une histoire plus complexe qui verrait l'essentiel de l'érosion concentré au cours des derniers millions d'années, sauf pour les parties les plus profondes et les plus larges, où elle aurait pu commencer il y a 70 millions d'années.

👁️ ZOOMS



AGENTS DE L'ÉROSION

L'essentiel des gorges du canyon a été formé il y a 6 à 1 million d'années, à un moment où les régions environnantes étaient soulevées par des mouvements telluriques. Le climat était alors beaucoup plus humide et l'ancien bassin du Colorado véhiculait d'énormes quantités d'eau. Les conditions désertiques actuelles ont empêché la végétation de recouvrir les couches de roches.



SCHISTES DE VISHNU

Ces couches, les plus basses et les plus anciennes, datent d'il y a 1 850 à 1 250 millions d'années. Plutôt que purement sédimentaires, elles sont surtout ignées et métamorphiques et ne renferment donc pas de fossiles. Elles sont constituées de roches et de minéraux variés : granit, pegmatite, gneiss et diorite. Leur grand âge explique qu'elles présentent beaucoup de déformations, de replis et de déplacements.



COUCHES DU PALÉOZOÏQUE

Ces couches avant tout sédimentaires se sont déposées au fond d'anciens océans et contiennent toute sorte de fossiles. Par exemple, le grès de Tapeats, daté d'il y a 520 millions d'années, renferme des trilobites et des brachiopodes. Vieux de 340 millions d'années, le calcaire de Redwall, épais de 245 m, contient des trilobites plus gros et évolués, mais aussi plus de brachiopodes ainsi que des spongiaires, des coraux, des nautiloïdes et des crinoïdes.



FORMATIONS RÉCENTES

La formation Toroweap, datée de 275 à 272 millions d'années, est composée de grès et de calcaires renfermant des fossiles marins, dont des coraux et des mollusques, mais aussi des végétaux terrestres. Cela indique qu'une mer s'étendant sur cette région s'est asséchée. Au-dessus, la formation calcaire de Kaibab, datée de 270 millions d'années, est riche en fossiles de coraux, trilobites, crevettes et grands nautilus mais aussi en conodontes et en dents de requins.



LACUNES CHRONOLOGIQUES

Comme celles de nombreux autres sites géologiques, les couches du Grand Canyon présentent des lacunes stratigraphiques : des strates récentes peuvent s'étendre sur d'autres plus anciennes sans couches intermédiaires. La datation absolue a ainsi révélé que dans certaines zones, le grès de Tapeats, daté d'environ 520 millions d'années, repose directement sur les schistes de Vishnu datés de 1 250 millions d'années (à gauche). En d'autres endroits, le grès de Tapeats est au contact du Supergroupe du Grand Canyon avec une différence de moins de 250 millions d'années. Il est probable que les strates manquantes disparurent du fait de leur érosion puis que des couches plus jeunes se déposèrent directement sur les anciennes. Les lacunes dans la chronologie des fossiles retrouvés, intrigantes, peuvent suggérer une extinction de masse suivie par l'apparition de nombreuses nouvelles formes de vie.

ORIGINES DE LA VIE



1 Cette vision d'artiste de la Terre à ses débuts montre des roches et des eaux brûlantes, des volcans, des tornades, des météorites et la jeune Lune.

2 Le Grand Bombardement Tardif (GBT) a laissé des stigmates (cratères de la Lune et de diverses planètes ou d'autres lunes).

3 Les veines quartzifères grossissent et se multiplient mais ne présentent aucune autre caractéristique propre au vivant.

Cosmologie, astrophysique, planétologie, paléobiologie – une discipline relativement neuve – et de nombreuses autres branches des sciences se conjuguent pour reconstituer les premières étapes du développement de la Terre. Les détails concernant l'apparition de la vie et ses premiers développements restent cependant peu connus.

La Terre a été formée au même moment que le reste du système solaire : les autres planètes, leurs lunes, les comètes, les astéroïdes, les météoroïdes, et, au centre, une étoile appelée Soleil. Diverses datations radiométriques (voir page 31) et des calculs théoriques en font remonter l'origine à environ 4 540 millions d'années. Une première étape, ayant duré 10 à 15 millions d'années, a vu sa formation par coalescence de tourbillons de poussière, de gaz et d'autres matières dont l'agrégation a fini par créer de la gravité. Cette proto-Terre n'avait absolument rien à voir avec la planète que nous connaissons : ayant la moitié de sa taille actuelle, elle tournait plus vite sur elle-même (un jour ne durait que quelques heures et non vingt-quatre) et sa surface était bouleversée par l'activité volcanique (voir image 1) et l'émission de jets gazeux brûlants. Peu de temps après sa formation, il y a 4 530 millions d'années, une planète de la taille de Mars (10 % de la masse de la Terre), Théia, est entrée en collision avec la proto-Terre. Une partie de sa matière s'y est agrégée et le reste

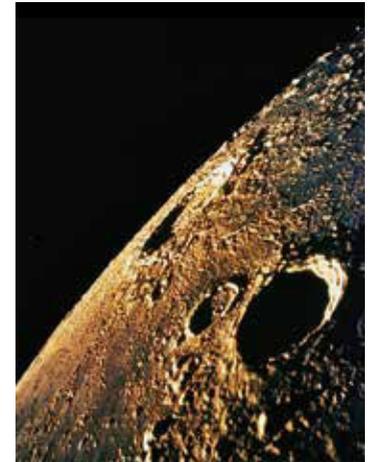
a formé un immense cortège de débris satellisés autour de la planète : leur coalescence progressive sous l'effet de leur propre gravité a formé la Lune. Cette dernière a exercé sur la Terre une force gravitationnelle significative qui a ralenti sa rotation. Le Soleil, lui-même encore jeune, n'avait que les deux tiers de sa puissance actuelle. Il n'y avait alors aucune place pour la vie sur la planète.

La croûte terrestre s'est refroidie et solidifiée progressivement. Mais, il y a 4 100 millions d'années, le Grand Bombardement Tardif (GBT) s'est traduit par la multiplication des collisions avec des essaims d'astéroïdes, de météorites et de comètes : il a duré 300 millions d'années. Les traces de ces impacts ont disparu de la surface terrestre depuis longtemps, mais, sur la Lune, les cratères (voir image 2) en constituent des cicatrices et l'analyse des roches fondues ramenées par les missions *Apollo* confirme ces datations. Le GBT a ajouté de la masse à la Terre mais a aussi fissuré sa croûte encore fragile. La planète s'est ensuite reformée et des structures géologiques aujourd'hui familières commencèrent à apparaître lentement, lorsque les plaques tectoniques eurent formé un puzzle supportant les continents au fond des océans.

Est-ce que la vie et ses premiers stades d'évolution apparurent avant le GBT, pour disparaître avec le cataclysme, puis réapparaître ? Certaines formes de vie purent-elles lui survivre puis se redévelopper ? Ou est-ce que la vie n'apparut qu'après le GBT, il y a 3 800 millions d'années ? Il n'existe aucun argument décisif permettant de trancher entre ces hypothèses. Mais une telle incertitude amène à se poser une autre question : qu'est-ce que la vie ?

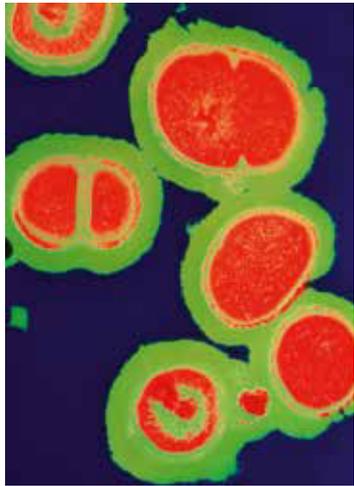
Les créatures vivantes présentent des caractéristiques spécifiques. Elles réalisent des réactions chimiques en associant des atomes et des molécules, en les dissociant et en les recombinaut sous diverses configurations. Ces réactions nécessitent de l'énergie : elle provient le plus souvent du rayonnement solaire grâce à la photosynthèse végétale ou de la digestion de nutriments riches en énergie lors de la digestion animale. Ces réactions métaboliques livrent des sous-produits qui sont éliminés – une autre caractéristique propre à la vie. La plupart des organismes vivants grandissent donc en incorporant des matériaux non-vivants et réalisent toutes ces activités grâce à des instructions codées chimiquement dans leur matériel génétique (généralement de l'acide désoxyribonucléique, ou ADN). Ils se reproduisent ou s'auto-répliquent en copiant et en transmettant à leur descendance ce matériel dont les modifications ou mutations permettent, au fil du temps, l'évolution. Ces caractéristiques distinguent le vivant du non-vivant, qui ne les possède pas toutes. Par exemple, des cristaux minéraux (voir image 3) ne peuvent que « grandir » en recrutant plus d'atomes ou de molécules ou se « reproduire » en formant des germes constituant le point de départ de la formation de nouveaux cristaux.

Les caractères de la vie sont faciles à reconnaître chez les végétaux, les animaux, les champignons et autres organismes familiers. Cela dit, à l'échelle microscopique et moléculaire, il est plus compliqué de déterminer où la vie



ÉVÉNEMENTS CLÉS

4 540 MA	4 530 MA	4 440 MA	4 100 MA	4 100-3 800 MA	4 000 MA	3 700 MA	3 500 MA	3 480 MA	2 300 MA	2 000-1 500 MA	720-600 MA
La Terre se forme. Extrêmement chaude, elle est formée de roches liquéfiées, soumise à une activité volcanique intense et aux impacts de nombreux corps célestes en orbite autour du Soleil.	Théia, un corps céleste de la taille de Mars, entre en collision avec la Terre et se désintègre. La gravité terrestre capte ses débris qui vont constituer la Lune. Le cycle nyctéméral est de 3 heures.	Une fine croûte solide se forme sur la Terre assez refroidie. Les constituants les plus lourds (fer, nickel) s'enfoncent dans la planète et y forment son noyau.	Les plus anciennes roches connues datent de cette période. Des cristaux (comme certains de zircon) sont peut-être encore plus anciens et datés de 4 400 MA.	Le Grand Bombardement Tardif (GBT) fragmente la croûte terrestre, mais la masse de la planète augmente.	Le premier éon géologique, l'hadéen, se referme et s'ouvre sur le deuxième éon, l'archéen.	La proportion relative de carbone C13 et C12 dans certaines roches suggère qu'une forme de vie puisse exister dès cette époque.	Âge des plus anciens fossiles connus : des organismes unicellulaires.	La croûte terrestre s'est reformée et des signes de vie sont retrouvés en Australie-Occidentale, sous forme de probables fossiles de bactéries.	La Grande Oxydation (ou Catastrophe de l'Oxygène) voit l'oxygène s'accumuler dans l'atmosphère, rendant la Terre plus favorable à la vie aérobie (voir page 39).	Les premières formes de vie pluricellulaires se développent par fusion d'organismes unicellulaires.	La « Terre boule de glace » constitue la période la plus longue et la plus froide qu'ait connue la planète. La journée dure alors 20 heures.



commence. Une cellule isolée telle une bactérie (voir image 4) ou le « blob » visqueux – qui est en fait un myxomycète (voir image 5) – présentent toutes les caractéristiques d'organismes vivants, mais ils en diffèrent pourtant beaucoup. L'amibe est dotée d'organites (ou organelles) incluant son matériel génétique dans un noyau, véritable centre de contrôle, et a aussi des centrales énergétiques appelées mitochondries ainsi que des unités digestives, les lysosomes. Chacune de ces structures est enveloppée comme un petit paquet dans une membrane et l'amibe entière est également entourée d'une protection formant comme une « peau » : la membrane cellulaire. La bactérie a elle aussi une membrane, mais interne, et elle est dépourvue d'organites. Le matériel génétique flotte librement dans une sorte de « soupe » aqueuse interne ; plus sommaire, il forme un simple anneau ou une boucle et non des chromosomes distincts comme chez l'amibe.

L'existence ou non d'organites ceints d'une membrane, la structure du génome et l'organisation générale de la cellule constituent les distinctions les plus élémentaires de la vie dont elles traduisent une étape primitive de l'évolution. Les bactéries sont désormais appelées procaryotes, alors que les amibes et presque tous les autres organismes (uni- ou pluricellulaires, végétaux ou animaux) sont des eucaryotes. Le processus évolutif ayant vu des cellules eucaryotes inclure des cellules procaryotes qui y ont formé des organites est l'endosymbiose.

La distinction entre procaryotes et eucaryotes fut revisitée à la fin des années 1970 lorsque des éléments nouveaux suggérèrent l'existence de deux groupes de procaryotes encore plus basiques, formant les domaines appelés Bacteria et Archaea (voir image 6) – le troisième domaine étant Eucaryota. Bacteria et Archaea se distinguent par des différences dans l'ARNr (acide ribonucléique ribosomal) qui, dans une cellule, permet l'assemblage des protéines. Comme les acides nucléiques ADN et ARNr, ces dernières constituent l'une des classes essentielles de molécules dans les organismes vivants où elles remplissent un grand nombre de fonctions, jouant un rôle structural et catalysant les réactions chimiques (sous forme d'enzymes). Les premières observations faites sur les archées (Archaea, les « anciennes choses ») ont montré que la plupart d'entre elles étaient des organismes extrémophiles (voir page 40), capables de se développer dans des conditions extrêmes de chaleur, de froid ou de salinité et ayant de nombreuses autres caractéristiques découvertes depuis.

S'il est probable que ce sont des organismes voisins des bactéries qui constituent les premières formes de vie terrestre, le développement antérieur d'une vie élémentaire à partir du matériel non-vivant (abiogénèse) pose d'autres questions. Les conditions environnementales sur la jeune Terre étaient radicalement différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui : les émissions gazeuses libéraient plus d'hydrogène, il y avait moins d'oxygène, plus de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, de sulfure d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de méthane – ces quatre derniers composés étant toxiques pour la plupart des organismes vivants actuels. L'eau se condensait à partir des gaz et, peut-être apportée aussi par des corps célestes comme les comètes, elle forma les premiers océans, brûlants, voire bouillants. Les gaz atmosphériques s'y solubilisèrent et les acidifièrent. Cette « soupe primordiale » constitua en fait une sorte de gigantesque laboratoire où les réactions chimiques s'enchaînaient au hasard et sans fin, stimulées par l'énergie fournie par les éclairs de tempêtes énormes et fréquentes, par l'énergie géothermique et le rayonnement solaire, car l'atmosphère ne protégeait pas la surface terrestre comme aujourd'hui.

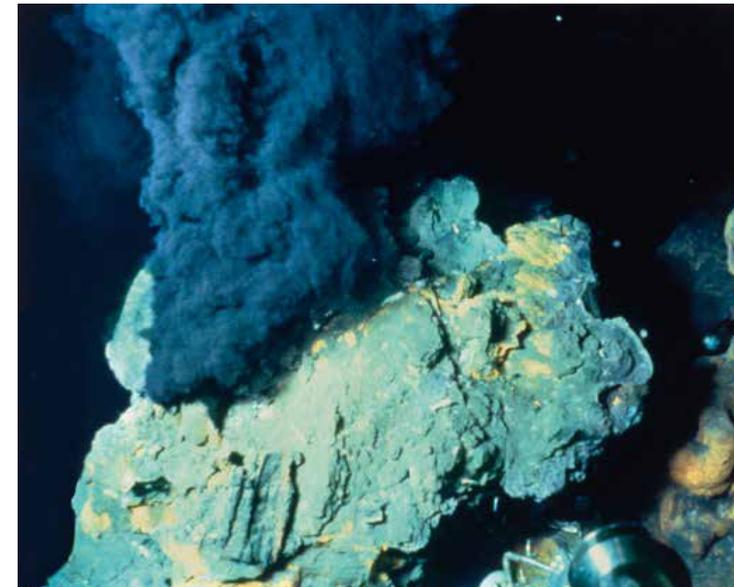
De nombreux spécialistes ont théorisé la façon dont les premiers éléments formant la vie ont pu s'agencer et exploiter les ressources énergétiques pour incorporer de nouveaux éléments, puis finalement s'auto-réplicuer : c'est le domaine de la biochimie, de la biologie moléculaire et de l'évolution biologique.

Le favori parmi les candidats ayant pu représenter une vie « élémentaire » est l'ARN, similaire à l'ADN en ce qu'il est formé d'une chaîne répétitive de monomères simples (« bases ») constituant un système d'information permettant de produire plus d'ARN du même modèle : ce scénario est connu sous le nom de « hypothèse du monde à l'ARN ». Progressivement, des protéines, des membranes et d'autres entités se sont adjointes et l'ADN a supplanté l'ARN. À un moment, ce processus (ou ces processus car il est probable que ces événements se sont répétés de façon récurrente sous diverses formes) conduisit à l'apparition du « Dernier Ancêtre Commun Universel » (DACU), l'organisme vivant le plus récent duquel descendent absolument toutes les formes de vie terrestre.

Selon d'autres approches, la vie, ou au moins ses éléments primordiaux, aurait été apportée de l'espace par des comètes, des astéroïdes ou des météorites. L'étude des bactéries extrémophiles montre que certaines pourraient survivre dans les conditions les plus inhospitalières du cosmos. Cette hypothèse pose la question de l'existence d'une forme de vie extraterrestre et suppose que la vie ait pu aussi être dispersée sur de nombreux autres corps célestes – pour peu que les conditions y soient favorables.

À la fin des années 1970, le submersible *Alvin*, explorant les fonds de l'océan Pacifique au voisinage des îles Galápagos, découvrit des sources hydrothermales abyssales (de nombreuses autres furent découvertes par la suite). De l'eau très chaude (parfois à plus de 400 °C) et saturée en sels minéraux surgit des fissures lézardant la lave figée, en provenance des profondeurs terrestres. Au contact de l'eau froide des océans (2 °C), ces sels minéraux précipitent et forment des nuages, d'où le nom de « fumeurs noirs » donné à ces sources (voir image 7).

Les organismes (dits chimiosynthétiques) colonisant ces milieux puisent leur énergie dans les minéraux et forment la base d'une chaîne trophique comprenant des vers, des mollusques, des céphalopodes, des crustacés, des poissons, etc. Ils forment de véritables communautés écologiques qui, contrairement à toutes les autres connues, sont totalement indépendantes de l'énergie solaire. Des spécialistes suggèrent que ces organismes illustreraient une première étape de l'évolution du vivant car, à l'époque, le rayonnement ultraviolet intense auquel était exposée la surface des océans y avait un effet destructeur sur toute forme de vie. **SP**



4

6

5

7

4 Procaryote : une bactérie typique (ici des staphylocoques, dont certains en voie de division) a une membrane externe ressemblant à une peau, mais pas de membranes internes.

5 Eucaryote : cette amibe géante du genre *Chaos* renferme des structures internes (organites) diversifiées, chacune enveloppée dans une membrane.

6 Archée : l'extrémophile *Pyrococcus* est un organisme thermophile périsant à moins de 70 °C.

7 À plus de 3 050 m sous la surface de l'océan Atlantique, le mont hydrothermal Saracen's Head émet des nuages de minéraux sulfurés. Il est possible que la vie ait d'abord colonisé ce type de milieu.

Premiers fossiles

ÉON ARCHÉEN



LOCALISATION Pilbara (Australie-Occidentale)

ÂGE 3 480 millions d'années

GROUPE Bacteria, Archaea

PROFONDEUR DES COUCHES Jusqu'à 1 m

Si la découverte de fossiles est aléatoire et toujours dictée par la chance, plusieurs facteurs limitent spécifiquement les possibilités de conservation des organismes très anciens : mous et minuscules, ils se développèrent à partir de fragments d'ARN pour donner des procaryotes unicellulaires (un alignement de 2 500 procaryotes n'excéderait pas 25 mm de longueur et il en tiendrait plus de 20 000 dans ce « o » imprimé) ressemblant à nos bactéries et à nos cyanobactéries (voir page 56).

Pourtant, des fossiles probables datés d'il y a 3 700 millions d'années livrent un aperçu captivant des premières formes de vie. Les schistes des couches de la chaîne de montagne Isua, au sud-ouest du Groenland, pourraient en effet porter la « signature » la plus ancienne de la vie : ils renferment un graphite biogénique, c'est-à-dire dont l'origine pourrait être biologique (son ratio spécifique entre carbone 12 et carbone 13 le différencie du graphite abiotique produit par un phénomène physique n'impliquant pas la vie). Les organismes l'ayant produit restent inconnus, mais ils devaient être voisins des cyanobactéries.

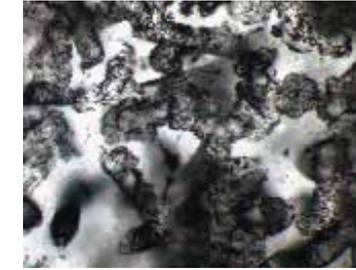
Des grès d'Australie-Occidentale datés d'il y a 3 480 millions d'années ont livré d'autres indices de vie, sous forme de structures sédimentaires construites par des micro-organismes : il s'agissait vraisemblablement de cyanobactéries ou d'organismes apparentés, captant l'énergie solaire par photosynthèse et émettant des déchets (dont du sulfure d'hydrogène gazeux), formant une sorte de « tapis » constitué probablement d'une masse visqueuse de fibres vertes, violettes et brunes. Divers fossiles retrouvés en Afrique du Sud révèlent des structures analogues datées de 2 900 millions d'années ; d'autres suggèrent de plus que les cellules simples procaryotes devinrent des cellules eucaryotes plus complexes il y a 2 000 à 1 500 millions d'années, avant de s'associer et de coopérer, formant alors les premiers organismes pluricellulaires. **SP**

👁️ ZOOMS



FOSSILES DE LA FORMATION DRESSER

Des milliers d'organismes marins unicellulaires vivaient dans la formation Dresser (cratère de Pilbara, Australie-Occidentale), y formant des stromatolithes, il y a 3 480 millions d'années. Les motifs de surface (fissures d'oscillations polygonales) démontrent que les structures sédimentaires créées par ces micro-organismes étaient affectées par les inondations, les sécheresses et les autres conditions environnementales.



CELLULES FOSSILISÉES

Niché entre des grains de sable qui constituaient peut-être jadis le fond d'un lagon, le grès de Pilbara renferme de probables fossiles d'organismes tubulaires d'un diamètre de 10 µ ressemblant à des bactéries. L'atmosphère de l'époque était pauvre en oxygène et ils vivaient en formant des communautés dans des eaux peu profondes.



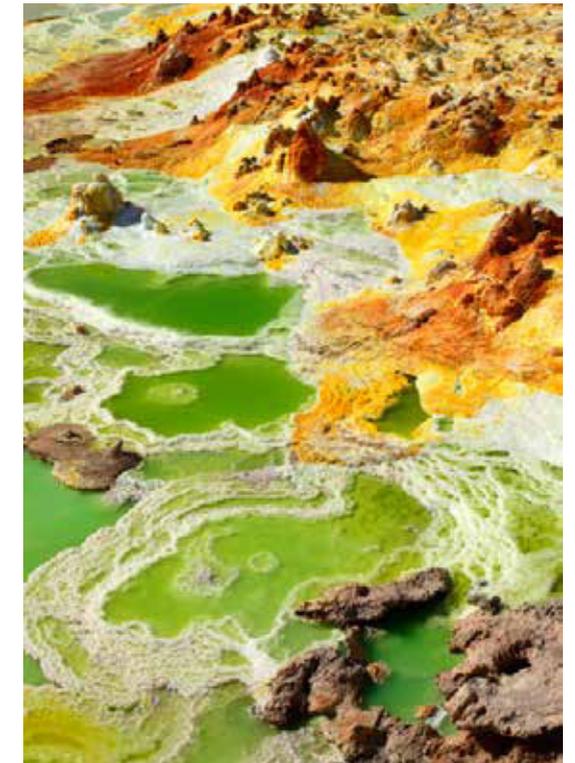
TAPIS MICROBIENS

Les micro-organismes de la formation Dresser constituaient des tapis microbiens (biofilms), i.e. de fines couches de cellules vivantes associées à des particules minérales. De telles communautés existent toujours dans les lagons et les eaux tidales, dans les playas et les sebkhas (des collections aquatiques éphémères et riches en sels minéraux qui subissent des inondations et des sécheresses récurrentes).



L'ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE

L'atmosphère terrestre des débuts de la vie serait fatale aux organismes actuels. Durant des millions d'années, les anciennes cyanobactéries produisirent de l'oxygène par photosynthèse et modifièrent peu à peu sa composition. Il y a 2 300 millions d'années, la crise de la « Grande Oxydation » se traduit par une augmentation importante de la teneur en oxygène et permit le développement d'organismes plus diversifiés. Des fossiles ressemblant à des « cookies », formés après cette crise, ont été découverts au Gabon dans des schistes noirs datés de 2 100 millions d'années. Nommés *Grypania* et mesurant jusqu'à 10 cm de longueur, ils pourraient avoir été formés par de grandes colonies d'organismes unicellulaires, mais des observations en microscopie électronique suggèrent qu'il pourrait s'agir aussi d'organismes pluricellulaires, dotés de nombreuses cellules coopérant à des tâches variées au bénéfice de la communauté tout entière.



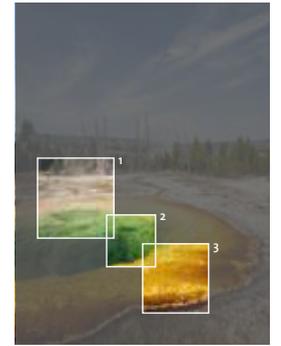
▲ Les archées, comme ces *Methanosarcina* productrices de méthane, ont très peu évolué depuis 2 000 millions d'années. *Methanosarcina* se développait en des temps anciens où l'atmosphère était riche en méthane, mais est inhibée par la teneur de l'atmosphère actuelle en oxygène. Cet organisme vit dans le tube digestif des animaux, les eaux d'égouts, les décharges et les sources hydrothermales des profondeurs.

Extrêmophiles

ÉON PROTÉROZOÏQUE-ÉPOQUE ACTUELLE



FOCUS



GENRES *Sulfolobus*,
Pyrococcus, etc.
GROUPES Archaea, Bacteria,
Algae
TAILLE 0,1 mm
LOCALISATION Parc de
Yellowstone, États-Unis

La plupart des organismes vivants supportent des conditions environnementales précises de température, d'hygrométrie, de concentration en divers composés (oxygène, dioxyde de carbone), de disponibilité en nutriments et de pH. La température doit être comprise entre 1 et 50 °C : juste au-dessus du point de congélation et jusqu'aux températures tropicales les plus élevées. Survivant toutefois à des conditions plus extrêmes, certains sont qualifiés d'« extrêmophiles » : l'étude des processus par lesquels ils s'adaptent à leur environnement inhospitalier permet de comprendre comment les premières formes de vie survécurent sur Terre. Les thermophiles prolifèrent à des températures comprises entre 60 et 120 °C et colonisent les sources chaudes, les geysers et les monts hydrothermaux sous-marins. Les cryophiles (psychrophiles) préfèrent des températures inférieures à -20 °C dans les régions polaires. Les xérophiles vivent dans les régions les plus sèches. Les halophiles requièrent de fortes concentrations en sel et se trouvent dans les lacs salés. Les oligophiles (oligotrophes) survivent avec une quantité minimale de nutriments. Les extrêmophiles sont essentiellement des micro-organismes unicellulaires et beaucoup appartiennent aux archées : un excellent exemple est celui des ARMAN (*Archaeal Richmond Mine Acidophilic Nanoorganisms*) isolés des drainages acides de la mine de Richmond de l'Iron Mountain (Californie) dont le pH, inférieur ou égal à 1,5 (comparable au contenu d'une batterie automobile), pourrait correspondre à celui des eaux saturées d'éléments minéraux de la Terre ancienne. Les ARMAN comptent parmi les plus minuscules organismes connus – ils sont des centaines de fois plus petits que des bactéries. **SP**

ZOOMS



1 DES SOURCES CHAUDES

L'eau des sources chaudes et des geysers dépasse parfois 100 °C après avoir été chauffée sous terre par la proximité du magma. Il peut aussi s'agir d'une eau ayant transité dans des fissures très profondes, où les roches sont naturellement chaudes, avant de remonter en surface sous l'effet de la pression.



2 DES ALGUES THERMOPHILES

Les algues sont des organismes ressemblant à des plantes qui exploitent l'énergie solaire. Certaines sont thermophiles, comme *Mougeotia* qui forme à une température modérée des filaments ressemblant à des cheveux verts. Leur association à des cyanobactéries colore en vert, bleu ou rouge les sources chaudes.

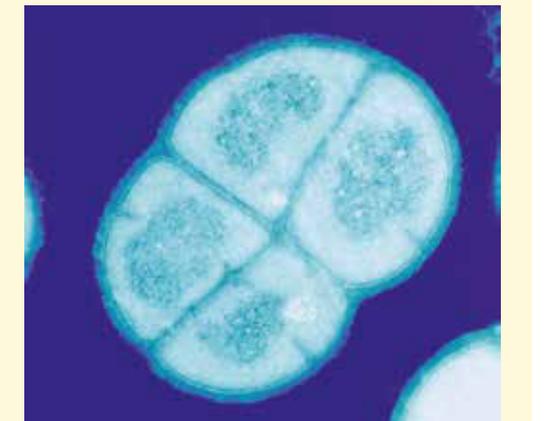


3 DES ARCHÉES THERMOPHILES

Les archées thermophiles forment un tapis, une écume ou une mucosité colorés recouvrant la roche sur les bords des fissures. Leur nature dépend du pH, de la teneur en nutriments de l'eau et de sa température : les *Sulfolobus* tolèrent par exemple une forte acidité et des températures allant jusqu'à 90 °C.

POLYEXTRÊMOPHILE

La bactérie *Deinococcus radiodurans* (ci-dessous) est la forme de vie la plus résistante connue sur la planète : son métabolisme pouvant éliminer les radicaux libres et un mécanisme lui permettant de réparer rapidement son ADN une fois endommagé par des radiations en sont révélateurs. Polyextrêmophile, elle supporte l'exposition aux radiations, un froid extrême, des milieux très acides, l'absence totale d'eau voire d'air. Elle aurait donc pu arriver sur Terre en provenant de n'importe où (voir page 34). La découverte de bactéries extrêmophiles colonisant les sources hydrothermales des profondeurs marines, à 1 500 m, où elles exploitent des dérivés du méthane ou des sulfures, suggère que de tels organismes survivraient sur d'autres planètes ou sur leurs lunes.



Stromatolites

ÉON ARCHÉEN-ÉPOQUE ACTUELLE



FOCUS

GROUPES Bacteria, Archaea et algues
TAILLE Jusqu'à 1,80 m de diamètre
LOCALISATION Shark Bay, Australie-Occidentale
ÂGE 3 500 ans pour les plus anciens



Certaines des premières constructions de la vie sur Terre étaient probablement similaires aux stromatolites (ou stromatolithes) actuels, de véritables « roches vivantes ». Ils sont formés par l'association d'organismes simples, souvent microscopiques, et de dépôts minéraux qui, s'étant accumulés durant des siècles et des millénaires, composent des structures de formes variées, en dômes ou en disques, dont les couches dessinent des motifs rubanés. Les stromatolites sont avant tout produits par l'activité des cyanobactéries (algues bleu-vert), parmi les premiers organismes apparus sur Terre (voir page 56), qui forment des tapis microbiens sur les surfaces rocheuses des eaux peu profondes. Elles accumulent des particules minérales et la superposition de nouvelles couches entraîne l'élévation des structures – ce processus évoque la genèse des coraux, mais à une moindre échelle.

Des stromatolites fossiles datent de l'éon archéen, il y a plus de 3 000 millions d'années. Il est cependant difficile de décider si leur origine fut biogène (impliquant la participation d'organismes vivants) ou inorganique (abiotique, avec dépôts de minéraux indépendants d'une participation du vivant). Très répandus il y a 1 500 à 800 millions d'années, les stromatolites livrent des informations précieuses sur la chimie des océans de l'époque, leur température, leur minéralisation et sur d'autres paramètres. Ils se raréfient ensuite dans les gisements fossilifères, peut-être du fait d'une modification dans la composition des océans, d'une compétition avec des algues ou des végétaux et de l'apparition d'animaux capables de s'en nourrir. Ces structures sont exceptionnelles de nos jours : elles s'observent dans des eaux peu profondes, fortement minéralisées (hypersalines) où peu d'animaux survivent. **SP**

ZOOMS



1 ACCUMULATIONS MINÉRALES

Les biofilms de cyanobactéries accumulent des particules sédimentaires en suspension dans l'eau sur leur surface formée d'un gel. En se multipliant, ces bactéries produisent de nouvelles couches, alors que celles qui se trouvent enfouies se compactent et forment une roche constituée de calcaire ou de dolomie. Les thrombolites sont analogues aux stromatolites, mais forment des groupements plus épars et non des masses agrégées.



2 TAPIS MICROBIENS

Les cyanobactéries productrices de stromatolites s'étendent généralement en formant une couche très fine où, associées à divers autres micro-organismes, elles constituent un « tapis microbien ». Divers animaux s'y incrustent : algues, colonies de bryozoaires, coraux et polypes ainsi que des stades juvéniles d'autres organismes, comme ceux des moules ou des bernacles.



3 FORMES

Chaque stromatolite a une géométrie unique, influencée par la température, la force des courants, la profondeur de l'eau, la concentration en nutriments, la quantité de sédiments en suspension et l'intensité solaire. Certains forment un dôme ou un champignon à tête aplatie, alors que d'autres se dressent comme des colonnes ou se ramifient. Leur aspect plissé, ridé, résulte de la formation de couches répétitives de carbonate de calcium.

FERS RUBANÉS

Les gisements de fer rubané constituent un type important de roches sédimentaires, formées de bandes superposées qui pourraient résulter de l'activité des cyanobactéries au début de l'histoire de la vie. Un fer rubané est constitué de couches de minéraux siliceux alternant avec des bandes argentées ou noirâtres de composés riches en fer, souvent sous forme d'oxydes type magnétite ou hématite. Ces strates mesurent de 1 mm à quelques centimètres. Les fers rubanés se forment quand l'atmosphère de la Terre était pauvre en oxygène. L'érosion de roches ferrugineuses ayant entraîné une accumulation de fer ferreux et de fer natif dans les océans, ce métal a réagi avec l'oxygène produit par les cyanobactéries et a précipité sous forme d'oxydes ferriques (« rouille »). Les cyanobactéries ont proliféré et leur activité a entraîné une augmentation de la teneur en oxygène telle que leur population a régressé. Des silicates minéraux clairs se sont déposés sur les couches et non plus des sels de fer rouges. Les taux de fer dissout ont augmenté à nouveau, le taux d'oxygène a diminué, les cyanobactéries ont ainsi proliféré et le cycle s'est perpétué. Les fers rubanés datent de 2 500 à 1 800 millions d'années.

