



## CHAPITRE **26**

# Origine et diversité de la vie

### Aperçu du chapitre

---

- 26.1 Les temps anciens
- 26.2 Origine de la vie
- 26.3 Preuves d'une vie primitive
- 26.4 Modifications de la Terre
- 26.5 Modifications constantes de la vie sur Terre

### Introduction

---

Les différentes formes de vie ont la même origine et beaucoup de choses en commun : elles sont formées d'une ou plusieurs cellules, elles ont un métabolisme, elles utilisent l'ATP pour les transferts d'énergie et elles codent l'information héréditaire dans l'ADN. Mais, d'autre part, la diversité des organismes vivants est extrême, elle va des bactéries et des amibes aux baleines bleues et aux séquoias. Les récifs coralliens, dont on voit ici un exemple, sont des microcosmes de diversité, ils comprennent de nombreuses formes de vie et abritent des organismes extrêmement divers. L'origine et l'histoire de la vie sur Terre sont étroitement liées aux modifications incessantes de la géologie, du climat et de l'atmosphère terrestres. Pour comprendre la diversité de la vie, il faut se poser des questions sur l'histoire de la Terre à l'échelle des temps géologiques et sur les conséquences de la vie elle-même sur les systèmes terrestres.

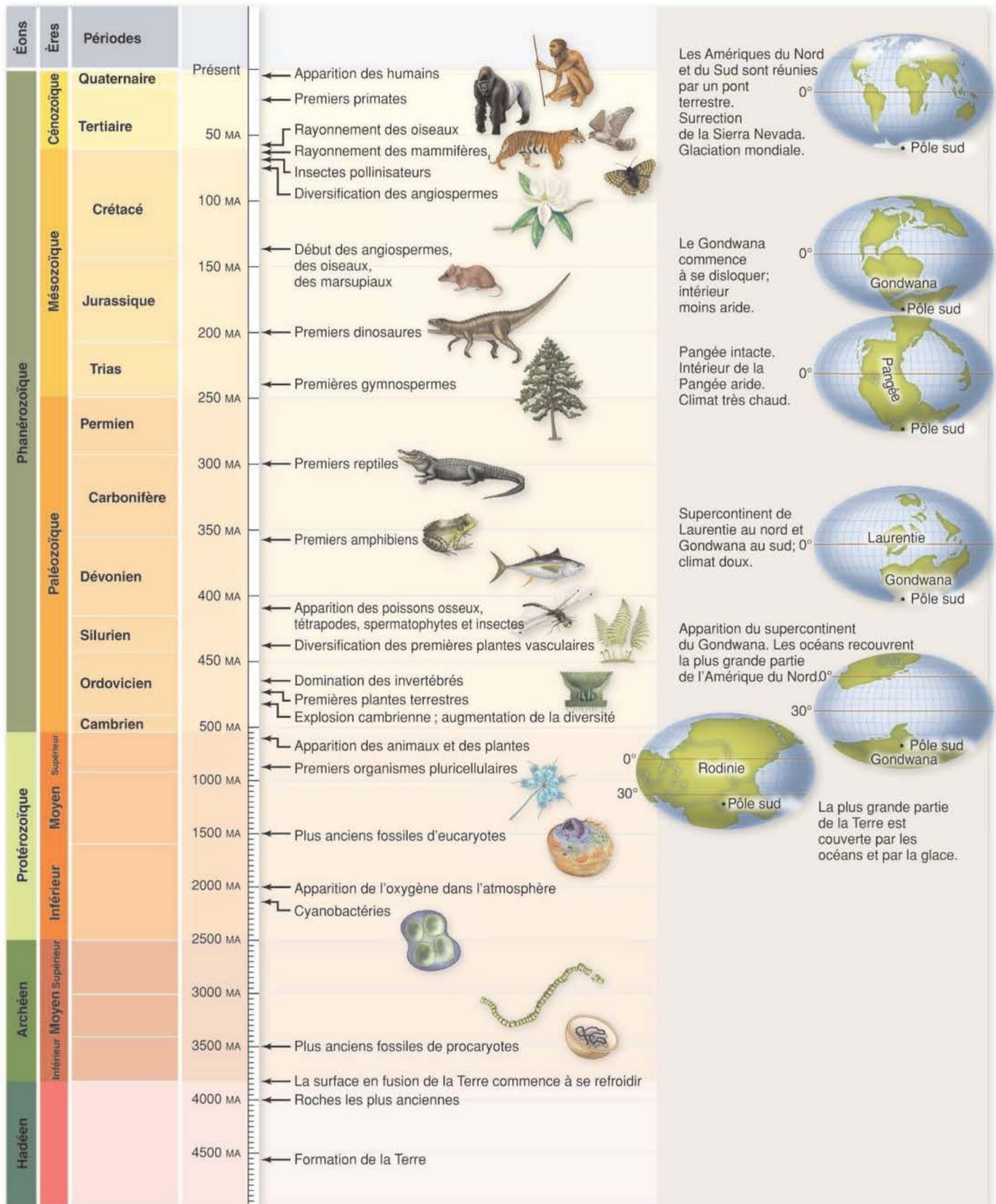


Figure 26.1 Échelle géologique et évolution de la vie sur la Terre.

## 26.1 Les temps anciens

### Objectifs

1. *Décrire l'histoire de la Terre.*
2. *Étudier les relations entre les événements géologiques et l'évolution de la vie.*

### La Terre s'est modifiée au cours des temps géologiques

Beaucoup de problèmes fondamentaux concernant l'histoire de la Terre sont géologiques. Pour étudier l'origine et la diversification de la vie sur des milliards d'années, il est important de s'intéresser aux époques géologiques anciennes. Les temps géologiques se divisent en quatre éons qui s'étendent sur 4,6 milliards d'années (figure 26.1). Les éons se divisent en ères, et celles-ci en périodes.

Depuis l'apparition de la Terre, les modifications sont telles qu'il n'existe pas de roches datant des premiers 500 à 700 millions d'années (l'éon hadéen) qui ont précédé des premiers fossiles. On ne peut préciser à quoi ressemblait la Terre primitive, mais les données géologiques sont compatibles avec l'hypothèse selon laquelle un météorite a frappé la Terre il y a presque 4,6 milliards d'années avec une force telle que des débris provenant de l'impact sont à l'origine de la Lune. Le manteau rocheux de la Terre a littéralement fondu, tandis que la température de l'atmosphère dépassait 2 000 °C.

Pendant le hadéen, la Terre a aussi été frappée par des astéroïdes qui ont pu vaporiser des océans entiers. C'était un environnement extrêmement dynamique, évoluant entre une Terre brûlante et parfois glacée, peu compatible avec la vie.

### Les taux de CO<sub>2</sub> se sont modifiés et ont affecté la température

L'atmosphère primitive contenait probablement beaucoup de CO<sub>2</sub> et l'eau s'est lentement transformée en vapeur à partir de la roche en fusion. La terre s'est refroidie pendant 2 millions d'années. Au cours de ce refroidissement, des nuages formés de silicates se sont condensés dans l'atmosphère, sont tombés sous forme de pluie et ont formé un océan chaud sous une atmosphère de CO<sub>2</sub>. Le taux de CO<sub>2</sub> a chuté, la terre s'est refroidie et l'océan a gelé pendant un certain temps.

La diminution du CO<sub>2</sub> a permis un abaissement de la température en réduisant la quantité d'énergie de radiation absorbée par l'atmosphère. Quelle est la cause du changement de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ? Les taux de CO<sub>2</sub> s'équilibraient dans l'océan et dans l'atmosphère. Les éruptions volcaniques ajoutaient du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et dans l'océan, tandis que la désagrégation des roches abaissait le taux de CO<sub>2</sub>.

Cette désagrégation était plus rapide sous un climat chaud et humide qu'en conditions froides et sèches. La désagrégation est une transformation des roches siliceuses en sol. La combinaison du CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'eau (H<sub>2</sub>O), entraîne une pluie d'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). L'acide carbonique réagit avec la roche et libère des ions bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et Ca<sup>2+</sup>. Les solutés sont passés dans les cours d'eau et l'océan pour former du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) qui a précipité et a séquestré le CO<sub>2</sub> dans l'océan (figure 26.2).

### Les continents se sont déplacés au cours des périodes géologiques

La croûte terrestre a formé des dalles de roche, des plaques, sous les continents comme sous les océans. Ces énormes plaques glissent chaque

année de quelques centimètres : on parle de tectonique des plaques. Ce terme tectonique provient du terme grec signifiant construire : les déplacements des plaques ont construit et sont encore à l'origine des caractéristiques géologiques de la Terre. La plupart des tremblements de terre importants et des volcans se situent en bordure des plaques en mouvement.

Le déplacement des plaques est lent mais, avec le temps, ses conséquences sont frappantes. Plusieurs fois, au cours de l'histoire terrestre, tous les continents ont été réunis en un seul supercontinent (voir figure 26.1). Deux supercontinents, Rodinie (tous les continents) et Gondwana (comprenant tous les continents actuels de l'hémisphère austral) ont existé à des époques différentes et ont occupé l'hémisphère sud. Le Gondwana a fait partie du supercontinent Pangée, complété il y a 225 millions d'années et qui a commencé à se disloquer de 25 à 50 millions d'années plus tard. Les géologues connaissent bien la tectonique des plaques, au moins pour les derniers 200 millions d'années, après la dislocation de la Pangée.

### La vie est apparue pendant l'archéen

À une certaine époque, la vie est apparue. On connaît des fossiles de l'éon archéen, qui a succédé au hadéen. Le protérozoïque (première vie) est apparu deux milliards d'années après la naissance de la Terre. Il était caractérisé par la formation du supercontinent Rodinie, qui s'est disloqué il y a 650 millions d'années en plusieurs continents avant le début du phanérozoïque (vie visible). Le hadéen, l'archéen et le protérozoïque forment ensemble le précambrien. Avec le début de l'ère paléozoïque du phanérozoïque, occupé d'abord par la période cambrienne, les organismes pluricellulaires se sont remarquablement diversifiés. À partir du phanérozoïque, les géologues et les biologistes commencent à s'intéresser aux périodes et à des durées de temps plus courtes.

L'éon phanérozoïque ne représente que 12 % de l'histoire terrestre, mais on y trouve la plus grande partie de l'histoire biologique de la diversification de la vie (voir figure 26.1). L'existence des oiseaux et des mammifères correspond à 12 % de la vie de la Terre, et les humains à 0,2 %.

### Questions d'apprentissage 26.1

L'histoire de la Terre couvre 4,6 milliards d'années, mais on possède peu de données géologiques concernant ce qui s'est passé pendant l'éon hadéen avant l'apparition de la vie. À l'origine, la Terre était inhospitalière pour la vie, mais, avec le changement des conditions, la vie est apparue il y a plus de 3 milliards d'années. Les espèces pluricellulaires ne sont apparues que pendant le dernier milliard d'années.

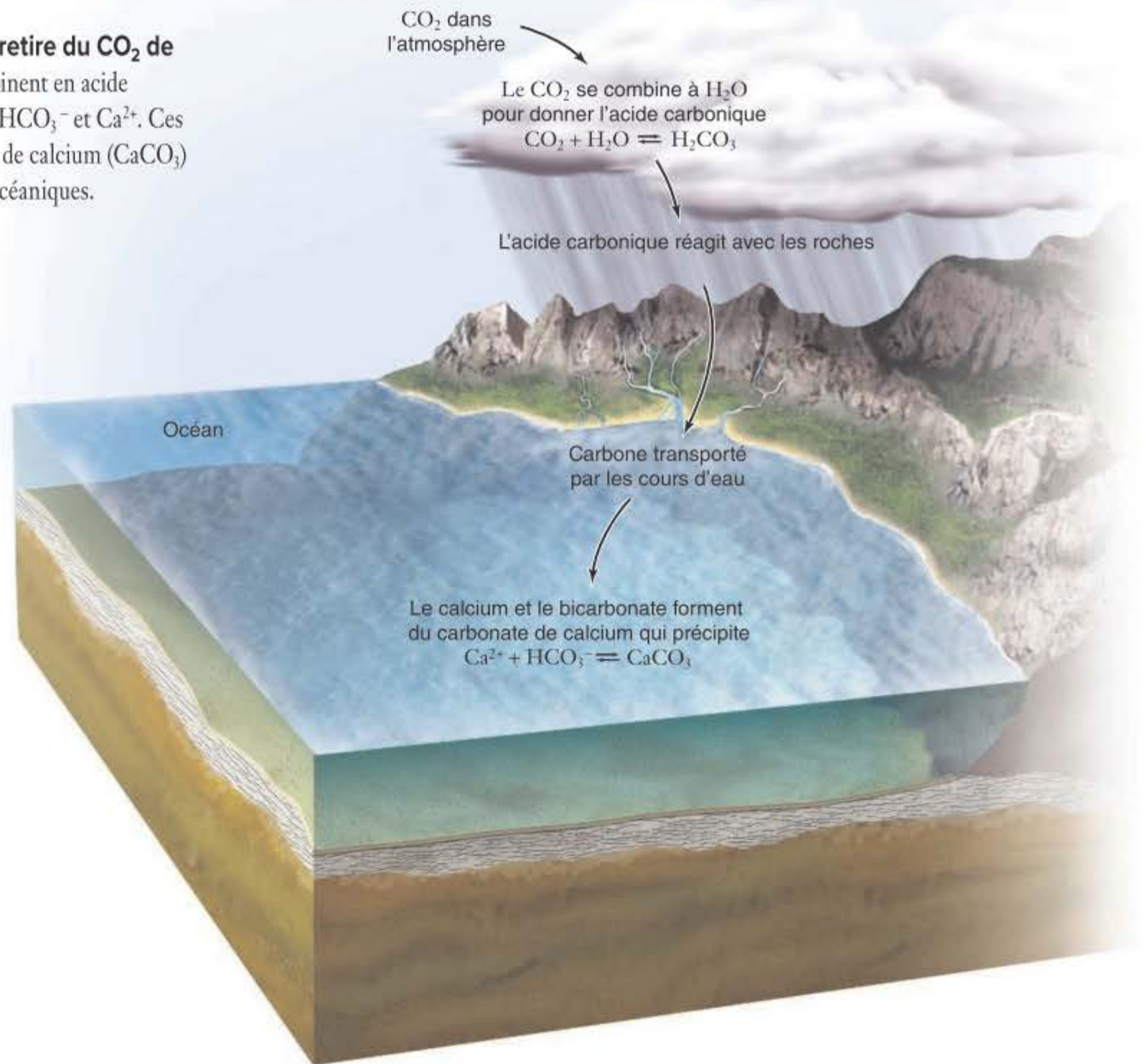
- *Si vous aviez la possibilité d'étudier la diversité des fossiles, quel éon choisiriez-vous ? Expliquez votre choix.*

## 26.2 Origine de la vie

### Objectifs

1. *Montrer les différences entre l'atmosphère d'aujourd'hui et celle qui est supposée avoir existé à la fin de l'éon hadéen.*
2. *Décrire les étapes clés nécessaires à l'apparition de la vie.*

**Figure 26.2** La dégradation des roches retire du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> de l'atmosphère se combinent en acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) qui réagit avec la roche et libère HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Ca<sup>2+</sup>. Ces ions sont lessivés vers l'océan et forment du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) qui précipite et stocke le carbone dans les sédiments océaniques.



Nous ne savons pas vraiment comment la vie a débuté sur Terre. N'étant pas capables de recréer aujourd'hui ce processus, nous devons envisager diverses voies d'exploration scientifique pour assembler le puzzle de l'origine de la vie, en partant de la géologie de la Terre primitive. À l'époque hadéenne, il y a environ 4,6 milliards d'années, la Terre était une masse chaude de roches en fusion. Quand elle s'est refroidie, la plus grande partie de la vapeur d'eau présente dans son atmosphère s'est condensée en eau liquide qui s'est accumulée en surface dans des océans chimiquement riches. Selon un scénario, la vie est apparue dans cette soupe diluée, chaude et malodorante d'ammoniaque, formaldéhyde, acide formique, cyanure, méthane, sulfure d'hydrogène et hydrocarbures organiques. Que ce soit sur les côtes, dans les sources hydrothermales des fonds marins ou ailleurs, les chercheurs s'accordent à dire que la vie est apparue spontanément dans ces eaux primitives. Le déroulement de ce processus reste une énigme, mais nous ne pouvons échapper à une certaine curiosité à propos des premières étapes qui ont finalement conduit à l'origine de tous les êtres vivants sur la Terre, nous-mêmes inclus. Comment les organismes ont-ils évolué à partir des molécules complexes qui s'agitaient dans les océans primitifs ?

Bien avant l'apparition de cellules possédant les propriétés de la vie, des molécules organiques (à base de carbone) se sont formées à partir de molécules inorganiques. L'apparition des protéines, des acides nucléiques, des glucides et des lipides était essentielle, mais insuffisante pour la vie. L'évolution des cellules impliquait l'association des molécules organiques primitives en une unité fonctionnelle interdépendante.

## Plusieurs origines sont possibles pour les premières molécules organiques

### *Les molécules organiques peuvent avoir une origine extraterrestre*

Les molécules organiques sont la base de tous les organismes vivants. On ne sait pas comment se sont formées les premières molécules organiques, et certaines pourraient avoir une origine extraterrestre. On sait que des centaines de milliers de météorites et de comètes ont atteint la Terre primitive et des découvertes récentes font penser que certaines au moins ont pu transporter de la matière organique. Par exemple, l'analyse chimique du météorite du lac Tagish, météorite rocheuse à base de carbone tombée en Colombie Britannique en 2000, a montré que près de 3 % de son poids était de nature organique. Les composés organiques solubles du météorite comprenaient des acides carboxylique et sulfonique, ainsi que des traces d'acides aminés. La glycine est l'acide aminé le plus abondant dans ce météorite et le rapport entre les isotopes de son carbone est différent de celui des roches terrestres, ce qui confirme l'origine extraterrestre de certaines molécules organiques.

### *Des molécules organiques ont pu apparaître sur la Terre primitive*

Très peu de géochimistes s'accordent sur la composition exacte de l'atmosphère primitive. Une idée populaire est qu'elle contenait principalement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'azote gazeux (N<sub>2</sub>), avec des

quantités significatives de vapeur d'eau ( $H_2O$ ). Il est possible que cette atmosphère contenait aussi de l'hydrogène gazeux ( $H_2$ ) et des molécules formées d'atomes d'hydrogène liés à d'autres éléments légers (soufre, azote et carbone) sous la forme de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), ammoniac ( $NH_3$ ) et méthane ( $CH_4$ ).

Une telle atmosphère est considérée comme une *atmosphère réductrice* à cause de la présence d'une grande quantité d'atomes d'hydrogène et de leurs électrons. Une atmosphère réductrice ne demanderait pas autant d'énergie pour effectuer des réactions chimiques qu'actuellement et l'apparition de molécules riches en carbone permettant l'évolution de la vie aurait donc été plus facile.

Une première tentative destinée à déterminer quels types de molécules organiques pourraient avoir été produites sur la terre primitive a été effectuée en 1953 par les chimistes américains Stanley L. Miller et Harold Urey. Dans ce qui allait devenir une expérience classique, ils tentèrent de reproduire les conditions des océans de la Terre primitive dans une atmosphère réductrice. Même si leur hypothèse s'est révélée incorrecte, cette expérience est très importante parce qu'elle inaugura le tout nouveau domaine de la chimie prébiotique.

Pour réaliser leur expérience, Miller et Urey (1) créèrent une atmosphère réductrice riche en hydrogène et dépourvue d'oxygène ; (2) ils disposèrent cette atmosphère au-dessus d'eau liquide ; (3) ils maintinrent l'ensemble à une température légèrement inférieure à  $100\text{ }^\circ\text{C}$  et (4) ils y simulèrent des éclairs d'orage sous forme de décharges électriques (figure 26.5).

Au bout d'une semaine, ces chercheurs constatèrent que 15 % du carbone présent à l'origine sous forme de méthane ( $CH_4$ ) avaient été transformés en d'autres composés carbonés simples, parmi lesquels du formaldéhyde ( $CH_2O$ ) et du cyanure d'hydrogène ( $HCN$ ). Ces composés se combinaient ensuite en molécules simples comme l'acide formique ( $HCOOH$ ) et l'urée ( $NH_2CONH_2$ ), ainsi qu'en molécules plus complexes, en particulier les acides aminés glycine et alanine.

Dans des expériences similaires réalisées ultérieurement par d'autres chercheurs, plus de 30 composés carbonés différents furent identifiés, parmi lesquelles les acides aminés glycine et alanine, mais

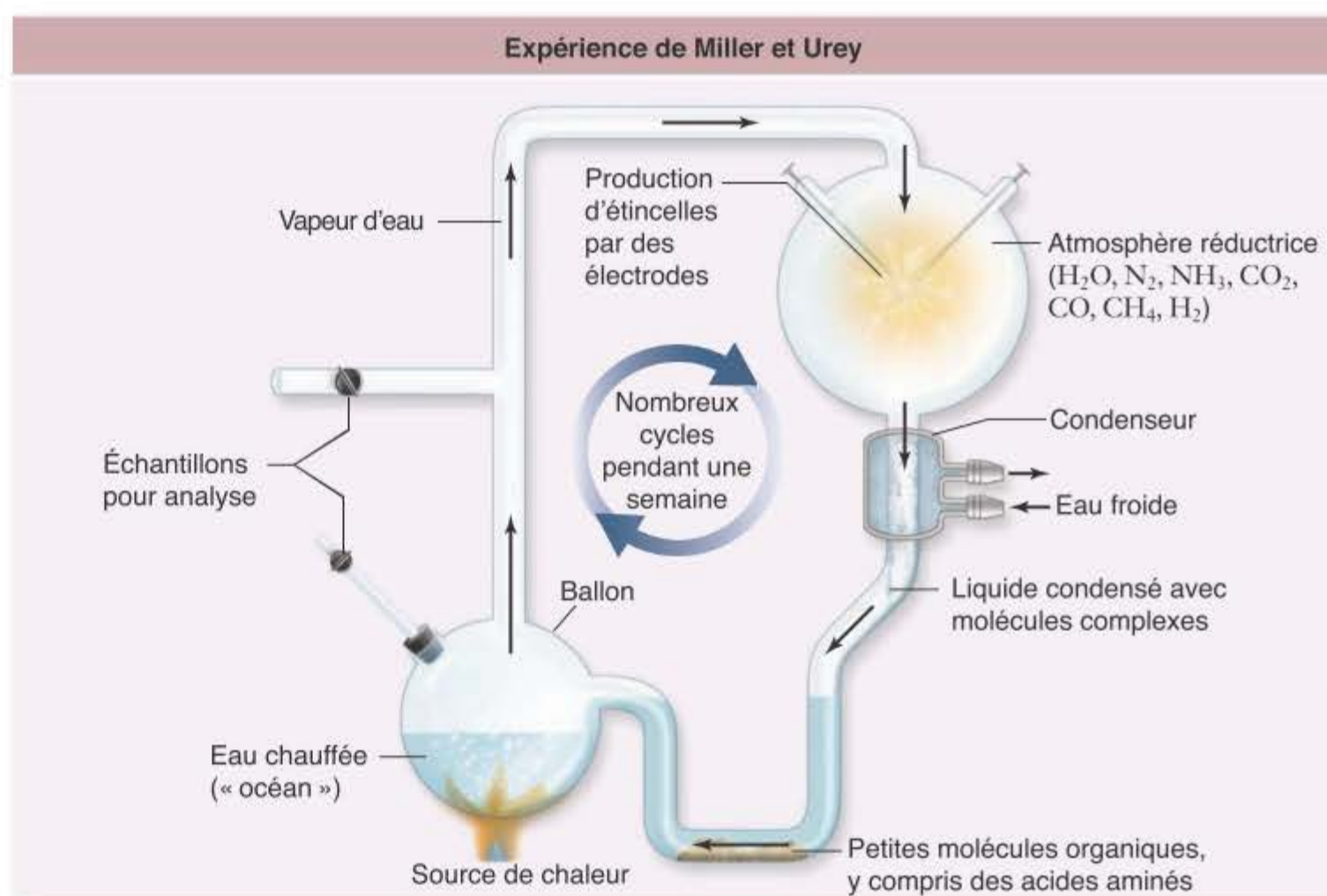
aussi acide glutamique, valine, proline et acide aspartique. Nous avons vu, au chapitre 3, que les acides aminés sont les éléments de base des protéines et que celles-ci constituent un des principaux groupes de molécules des être vivants. D'autres molécules d'importance biologique se sont aussi formées dans ces expériences. Par exemple, le cyanure d'hydrogène intervenait dans la synthèse d'une molécule cyclisée complexe, l'adénine – une des bases de l'ADN et de l'ARN. Des molécules essentielles pour la vie pouvaient donc s'être formées dans l'atmosphère réductrice de la terre primitive.

## Les voies métaboliques peuvent être apparues de diverses façons

Il existe de nombreuses hypothèses à propos de l'émergence des voies métaboliques. Selon un scénario, les organismes primitifs étaient autotrophes et construisaient toutes les molécules organiques complexes nécessaires à partir de composés inorganiques simples ; ce n'étaient pas des hétérotrophes trouvant tous leurs composants organiques dans leur environnement. Par exemple, la synthèse du glucose a été possible à partir de formaldéhyde,  $CH_2O$ , dans les conditions alcalines supposées sur la terre primitive. On a proposé la glycolyse et une forme du cycle de Krebs (voir chapitre 7) fonctionnant sans enzymes comme point de départ d'autres voies métaboliques. Il est possible que les premiers autotrophes pouvaient fabriquer, stocker et utiliser ultérieurement le glucose comme source d'énergie.

Sont aussi apparues les enzymes catalysant les voies métaboliques. Bien que la plupart des enzymes soient des protéines, l'ARN peut catalyser des réactions, tout en stockant l'information génétique. Selon la théorie d'un monde d'ARN, ce n'est pas l'ADN, mais l'ARN qui a été le premier acide nucléique permettant l'autoréplication, étape importante en direction de la vie. L'ADN, plus stable que l'ARN, a ensuite repris à son compte le stockage de l'information. Avec des éléments de construction très divers (les acides aminés), les protéines se sont chargées de la fonction enzymatique.

**Figure 26.3** L'expérience de Miller et Urey. L'appareil comportait deux ballons reliés par un tube. La chambre supérieure contenait un mélange de gaz supposé imiter l'atmosphère terrestre primitive. Un jeu d'électrodes simulait la foudre déchargeait des étincelles au sein de ce mélange gazeux. Les gaz étaient ensuite refroidis en passant par un condenseur, entraînant la formation de gouttes d'eau qui entraient dans le second ballon chauffé, simulant l'océan. Toute molécule complexe éventuellement produite dans le premier ballon se retrouvait dissoute dans les gouttes d'eau et amenée dans l'océan dont on prélevait des échantillons pour analyse.



## 26.3 Preuve d'une vie primitive

### Objectif

1. Évaluer les données fossiles pour dater l'origine de la vie

Les ribosymes sont des séquences d'ARN fonctionnant comme enzymes. Les meilleurs arguments en faveur d'un monde d'ARN reposent sur le ribosome, utilisé par les cellules pour traduire l'ARN en protéines. Le ribosome est formé de protéines et d'ARN, mais c'est une séquence de l'ARN qui intervient dans le mécanisme central de la traduction. C'est compatible avec l'hypothèse qui attribue à l'ARN la catalyse de la synthèse des peptides à partir d'une séquence d'ARN. Bien que beaucoup d'arguments soient en faveur d'un monde primitif d'ARN, cette hypothèse soulève encore des questions. Avec ce que nous savons de la Terre prébiotique, il est peu probable qu'il existait alors beaucoup de ribose, sucre indispensable pour la colonne vertébrale de l'ARN. Des recherches ont montré que la synthèse des nucléotides d'ARN est possible en l'absence de ribose pur dans les conditions qui sont supposées avoir existé sur la Terre prébiotique.

Un autre défi pour cette hypothèse était la formation des longues chaînes de nucléotides de l'ARN. Il semble que les nucléotides pouvaient se concentrer sur des surfaces argileuses où pouvaient se former les liaisons entre les nucléotides concentrés. La formation des liaisons a pu aussi être facilitée par une concentration de nucléotides dans les cristaux de glace d'eau salée. Ces nouvelles découvertes sont en accord avec l'hypothèse d'un monde d'ARN.

### Les premières formes de vie étaient des cellules isolées

En plus d'un métabolisme, les cellules ont besoin de membranes. Le confinement des molécules organiques dans un espace physique au sein d'une bulle lipidique ou protéique pouvait accroître la concentration de molécules spécifiques et augmenter ainsi la probabilité des réactions métaboliques.

Alors que les membranes modernes sont constituées d'une bicouche de phospholipides (voir chapitre 7), les premières membranes étaient peut-être formées d'acides gras. Ce sont des molécules plus simples que les phospholipides et leur apparition était plus probable dans les conditions prébiotiques. Comme les phospholipides, ils possèdent des têtes hydrophiles et des queues hydrophobes ; ils peuvent ainsi former des bicouches et envelopper des structures de type cellulaire.

À un certain moment, ces bulles sont devenues des cellules vivantes avec des membranes et les propriétés de la vie décrites dans l'introduction. Pendant la plus grande partie de l'histoire de la vie sur Terre, ces organismes unicellulaires ont représenté la seule forme de vie. Nous ne savons pas exactement comment ces cellules sont apparues parce que nous ne pouvons pas recréer ce processus mais, à une certaine époque, une vie cellulaire simple est apparue.

#### Questions d'apprentissage 26.1

L'apparition extraterrestre des molécules organiques nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre et leur arrivée dans des météorites reste une question ouverte. On ne peut pas reconstituer parfaitement les conditions présentes sur la Terre primitive, mais il est probable que les températures étaient extrêmes, que la composition des gaz de l'atmosphère était très différente de celle d'aujourd'hui et qu'elle a permis l'évolution de molécules organiques, de voies métaboliques et de cellules.

- Si vous pouviez voyager dans le temps sur la Terre primitive et en revenir avec un échantillon de matière, quels types de molécules étudieriez-vous pour élucider l'origine de la vie primitive ?

Mieux nous connaissons l'histoire ancienne de la Terre, plus il semble évident que les premiers organismes sont apparus et ont vécu à des températures très élevées. Il y a quelque 3,8 milliards d'années, on pense que la température des océans est descendue entre 49 et 88 °C. Cette époque correspond à l'apparition de la vie, peu après que la Terre soit devenue habitable. Aussi intolérable que puisse nous sembler aujourd'hui la température de la Terre primitive, elle a permis la naissance de la vie. Nous examinons ici les arguments en faveur d'une vie entre 3,2 et 3,8 milliards d'années.

### Des fossiles montrent que la vie a pu apparaître il y a 3,2 milliards d'années

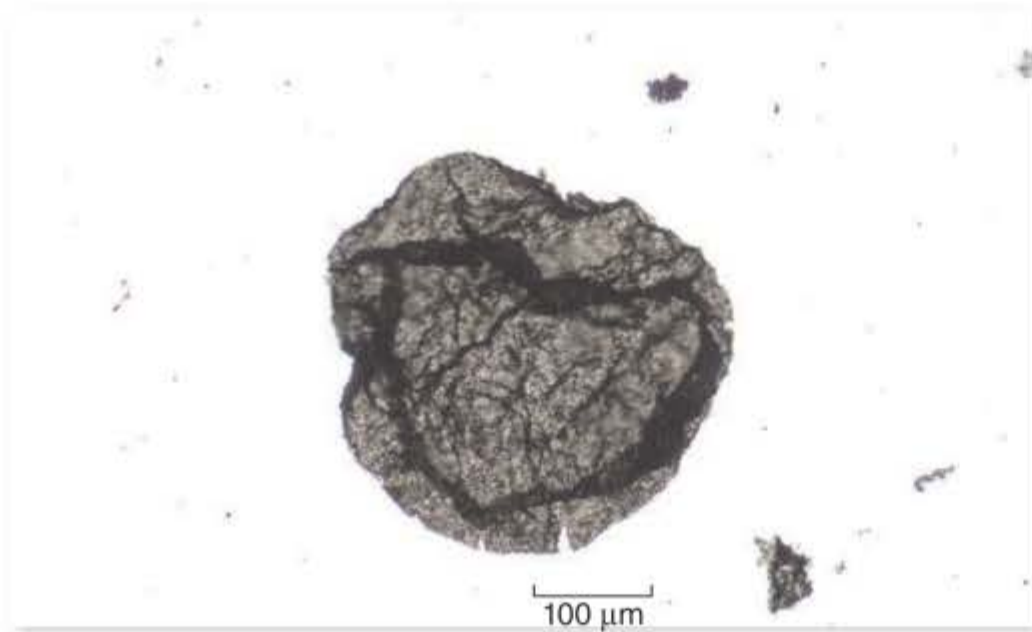
La vie peut être apparue au cours de l'archéen, mais il est difficile de trouver des microfossiles pour le prouver et de les interpréter. Des processus non biologiques peuvent entraîner l'apparition de structures ressemblant à des microfossiles et les roches d'un âge supérieur à 3 milliards d'années ont généralement été modifiées par des facteurs géologiques. On a découvert deux grandes formations de roches âgées de 3,5 à 3,8 milliards d'années pratiquement intactes : les cratons de Kaapvaal en Afrique du Sud et de Pilbara en Australie Occidentale. (Un *craton* est une assise rocheuse de croûte continentale non modifiée.) Dans ces deux formations et dans d'autres, on a trouvé des structures considérées comme d'origine biologique. Bien que cette interprétation ait été controversée, les arguments se sont accumulés au cours du temps pour dire qu'il s'agit de véritables fossiles.

Ces microfossiles sont des formes fossilisées de vie microscopique. Beaucoup sont petits (1-2 µm de diamètre) et paraissent unicellulaires, sans appendices externes et sans trace de structure interne. Ces microfossiles semblent donc ressembler aux procaryotes actuels.

Actuellement, les microfossiles les plus anciens sont âgés de 3,5 milliards d'années. L'origine biologique de ces microfossiles est attestée par des données isotopiques et par l'analyse spectroscopique qui indique la présence de molécules carbonées complexes. Le fait que ces structures microscopiques soient de véritables cellules fossiles reste controversé, et l'identité des groupes procaryotes représentés par les différents microfossiles n'est pas claire.

Une meilleure preuve découle de microfossiles d'un diamètre de 300 µm qui faisaient partie de coussinets microbiens dans des milieux marins peu profonds d'Afrique du Sud il y a 3,2 milliards d'années (figure 26.6). Au microscope électronique à balayage, on peut voir des parois plissées (épaisses de 160 nm) entourant ces structures carbonées. Le microscope électronique à transmission montre des vésicules creuses à parois organiques entre les parois comprimées. Ces parois sont semblables à celles des microfossiles protérozoïques dont l'origine biotique est bien prouvée. La taille de ces microfossiles âgés de 3,2 milliards d'années est compatible avec celle des cellules eucaryotes, mais ce sont plus vraisemblablement des cyanobactéries (décrites un peu plus loin).

Outre ces microfossiles, on trouve des preuves indirectes d'une vie ancienne sous la forme de dépôts sédimentaires appelés **stromato-**



**Figure 26.4** Microfossil âgé de 3,2 milliards d'années provenant d'Afrique du Sud.

**lites** (figure 26.5). Ces structures sont généralement considérées comme une combinaison de dépôts sédimentaires et de matériaux précipités fixés par des paquets de micro-organismes. On suppose que ces micro-organismes sont des cyanobactéries. Ces stromatolites remontent à 2,7 milliards d'années. On connaît aussi des stromatolites relativement modernes ; la formation et la nature biologique de ces structures est donc moins sujette à caution.

### Les données isotopiques montrent que la fixation du carbone est un processus ancien

Un autre moyen de savoir quand la vie a débuté consiste à rechercher la signature des systèmes vivants dans les couches géologiques. Les systèmes vivants modifient leur environnement, et il est parfois possible de déceler ces changements. La modification la plus évidente est la sélectivité des systèmes vivants pour les isotopes de carbone dans les molécules qu'ils utilisent. Les organismes vivants incorporent le  $^{12}\text{C}$  dans leurs cellules avant tout autre isotope et ils modifient ainsi les proportions de ces isotopes dans l'atmosphère. La teneur en  $^{12}\text{C}$  est également plus élevée dans leurs restes fossilisés que dans les roches non organiques qui les entourent.



**Figure 26.5** Stromatolites. Des paquets de cellules bactériennes retiennent des dépôts minéraux et forment ces dômes caractéristiques.

On a beaucoup travaillé pour dater et analyser les composés carbonés dans les roches les plus anciennes afin d'y rechercher des signatures de la vie. L'analyse des traces de carbone indique une fixation active de cet élément, l'incorporation du carbone inorganique sous une forme organique, il y a déjà 3,8 milliards d'années, ce qui correspond à la datation des microfossiles les plus anciens.

À l'origine, deux voies principales étaient possibles pour la fixation du carbone. La voie la plus commune est le cycle de Calvin (voir chapitre 8). C'est le moyen utilisé par les cyanobactéries, les algues et les plantes terrestres modernes qui utilisent un mécanisme à deux photosystèmes libérant l'oxygène. Le cycle de Calvin fonctionne aussi dans les bactéries sulfureuses vertes et pourpres qui utilisent un seul photosystème sans libération d'oxygène. Cette forme de photosynthèse anoxygénique pourrait avoir fonctionné au début de la fixation du carbone.

Jusqu'à présent, on n'a pas prouvé l'ensemble du cycle de Calvin chez les archées (un groupe de procaryotes), en dépit de l'identification de l'enzyme clé de ce cycle dans quelques isolats d'archées. Certaines archées utilisent une version réductrice du cycle de Krebs (voir chapitre 7). Ce mode de fixation du carbone est aussi utilisé par certaines bactéries lithotrophes, qui tirent leur énergie de l'oxydation de molécules inorganiques, et des bactéries sulfureuses vertes. Il existe aussi deux autres voies chez les lithotrophes, les archées et les bactéries vertes non sulfureuses. Il semble que la faculté de fixer le carbone est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution.

### Certains glucides découverts dans les roches anciennes peuvent avoir une origine biologique

Une autre façon de trouver des preuves d'une vie ancienne consiste à rechercher des molécules organiques dont l'origine est clairement biologique ; ces molécules sont des *biomarqueurs*. Cette méthode semble simple, mais on a constaté qu'il était difficile de trouver ces marqueurs. Les glucides sont des biomarqueurs : ils dérivent des queues d'acides gras des lipides. On peut analyser leurs isotopes de carbone pour trouver leur origine biologique. L'analyse des glucides extraits de la formation de Pilbara en Australie a permis de trouver des lipides indiquant l'existence de cyanobactéries il y a 2,7 milliards d'années. La recherche de marqueurs chimiques provenant avec certitude de systèmes vivants dans les roches les plus anciennes et dans les météorites suscite beaucoup d'intérêt.

#### Synthèse 26.3

Les microfossiles sont des arguments en faveur de l'existence de cellules anciennes. Les plus âgés sont controversés, mais ils datent d'au moins 3,5 milliards d'années. D'autres arguments en faveur d'une vie primitive découlent des rapports isotopiques, qui sont biaisés par l'activité biologique. Le cycle de Calvin et une forme réductrice du cycle de Krebs, ainsi que d'autres voies, semblent avoir abouti à la fixation du carbone dans la vie primitive. Certains glucides semblent constituer des biomarqueurs et peuvent donc aussi indiquer des formes de vie anciennes.

- Vous avez découvert un fossile qui peut être une cellule bactérienne primitive. Quel argument pourrait vous convaincre qu'il s'agit bien d'une cellule bactérienne ancienne ?

## 26.4 Modifications de la Terre

### Objectifs

1. Expliquer les rapports entre les niveaux de  $\text{CO}_2$  et les glaciations.
2. Démontrer le rôle de la tectonique des plaques sur l'évolution de la vie sur la Terre.

Parmi les nombreux facteurs qui affectent la possibilité pour les organismes de survivre et de se reproduire, se trouvent le climat (température et disponibilité de l'eau) et l'atmosphère (comme les taux de  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ ). Pendant l'histoire de la Terre, tous ces facteurs ont subi des modifications dramatiques, entraînant des extinctions de masse et influençant diversement le cours de l'évolution. (le phénomène de l'extinction de masse est décrit au chapitre 27). Le déplacement des plaques est à l'origine des éruptions volcaniques qui modifient l'atmosphère, par exemple, tout simplement en arrêtant la lumière solaire. L'oscillation du taux de  $\text{CO}_2$  pendant les temps géologiques est liée aux changements de température : une augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  capte la chaleur émanant de la Terre et crée un effet de serre (voir chapitre 58). Certains changements affectant le climat et l'atmosphère ont une origine purement géologique, mais les organismes vivants interviennent dans d'autres. Par exemple, l'évolution de la photosynthèse a augmenté la concentration de  $\text{O}_2$  dans l'atmosphère. Dans cette section, nous tentons de voir comment les modifications du climat et de l'atmosphère ont affecté la Terre et la vie terrestre au cours des temps géologiques.

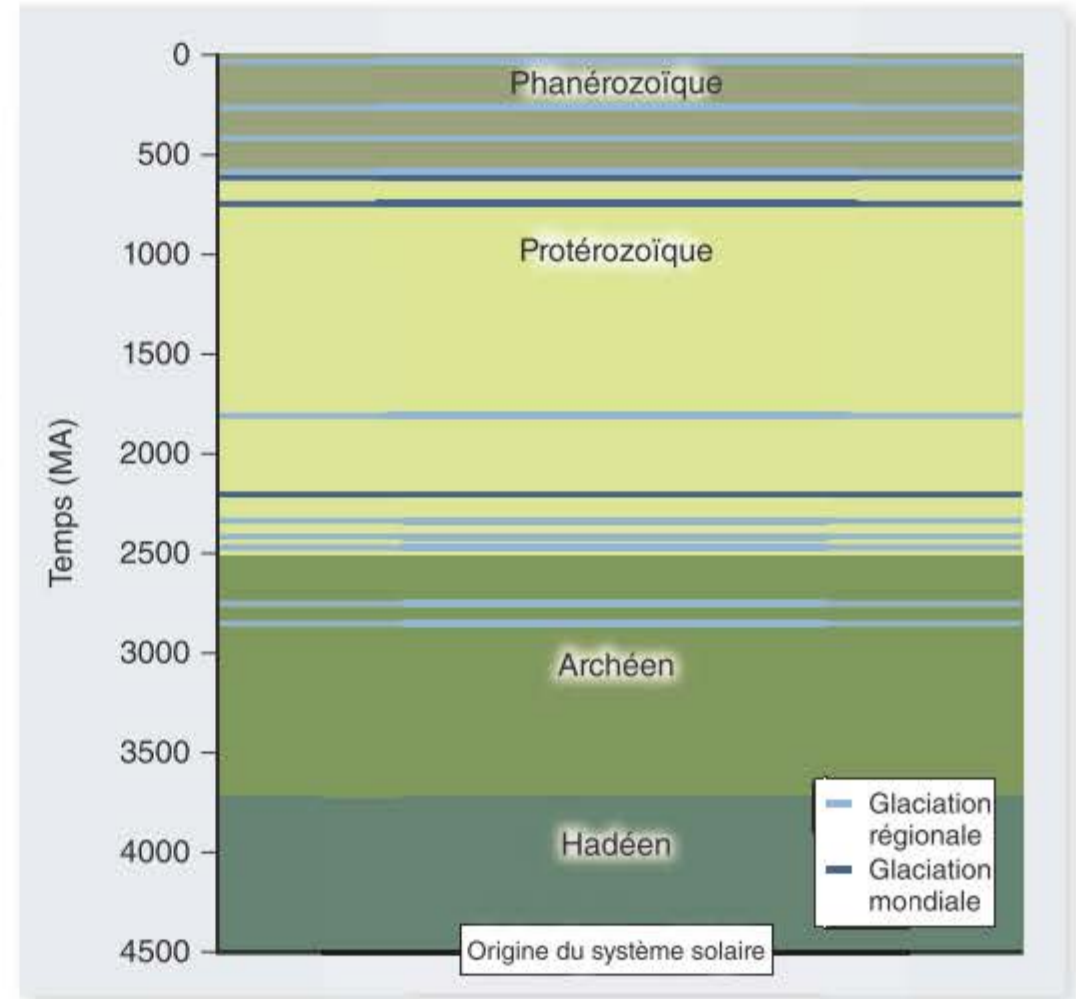
### Le climat de la Terre a toujours été changeant

La gamme des températures et des pluies au cours de l'histoire de la Terre est étonnante. La Terre primitive a subi des températures supérieures à  $2000^\circ\text{C}$  et des températures globales moyennes de  $-50^\circ\text{C}$ , y compris trois chutes brutales exceptionnelles qui se sont produites au début et à la fin du protérozoïque et ont décimé la vie. Ces chutes extrêmes de température ont entraîné la formation d'une couche de glace sur toute la Terre, d'un pôle à l'autre : on a parlé de *Terre boule de neige* (figure 26.6). Dans ces conditions, la glace réfléchissait la plus grande partie de l'énergie provenant du Soleil et maintenait les basses températures. Même à l'équateur, les températures n'auraient pas dépassé  $-20^\circ\text{C}$ , ce qui correspond aux températures actuelles dans l'Antarctique. Les océans étant gelés, les températures étaient moins tamponnées et plus changeantes qu'actuellement.

### Les modifications de l'atmosphère s'expliquent par des changements géologiques et par les organismes vivants

Les changements géologiques peuvent expliquer beaucoup de modifications de la composition de l'atmosphère, mais pas toutes. Les organismes vivants ont aussi altéré substantiellement l'atmosphère, comme on le verra dans la section 26.5. Nous prendrons ici l'exemple du  $\text{CO}_2$ , en sachant que les modifications de la concentration des autres gaz de l'atmosphère, comme  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  et  $\text{CH}_4$  ont affecté l'évolution de la vie terrestre.

Au moment des deux dernières glaciations du paléozoïque supérieur, la plus grande partie des continents étaient sous les tropiques (voir



**Figure 26.6** Trois glaciations globales se sont produites pendant le protérozoïque.

figure 26.1). En temps normal, le climat chaud et humide des tropiques accélérerait la dégradation des roches, entraînant une diminution significative de la concentration du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. La diminution concomitante de la température a réduit l'érosion et stabilisé la température et la concentration du  $\text{CO}_2$ . On suppose que l'érosion a conduit aux glaciations du protérozoïque supérieur.

Outre les changements de l'érosion liés au climat chaud et humide, la tectonique des plaques peut aussi avoir affecté l'érosion, et donc le taux de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Quand un vaste continent se brise en plusieurs pièces, une plus grande surface littorale est exposée à l'océan et devient plus humide. La plus grande humidité entraîne une érosion plus forte et une concentration en  $\text{CO}_2$  plus faible dans l'atmosphère. L'augmentation de l'érosion due aux glissements des continents au protérozoïque supérieur a donc aussi contribué aux glaciations.

### L'évolution a été influencée par le déplacement des continents

Le déplacement des plaques intervient dans la modification de l'atmosphère et du climat, mais il influence également l'évolution en isolant des populations ou en permettant des croisements entre populations d'abord séparées (voir chapitre 22). Les continents reposent sur des plaques submergées qui se déplacent. Pendant l'éon protérozoïque, toutes les masses terrestres formaient un seul continent, Rodinie, qui a commencé à se fractionner en continents plus petits il y a environ 700 millions d'années. Ces déplacements, et d'autres, se sont poursuivis pendant l'histoire de la Terre (voir figure 26.1).

L'ère paléozoïque a débuté par une grande diversification de la vie au cambrien et plusieurs continents séparés. Mais, à la fin du paléozoïque, la Terre a une fois de plus porté un seul continent, la Pangée. Pendant le carbonifère et le permien, de grandes collisions de continents ont clôturé le développement de la chaîne des Appalaches en Amérique du Nord, tandis que l'Amérique du Nord et l'Afrique du nord-ouest

entraient en collision. La Pangée a persisté pendant 100 millions d'années et elle a commencé à se rompre pendant le trias supérieur et le jurassique inférieur de l'ère mésozoïque.

L'ère cénozoïque actuelle a débuté il y a 65 millions d'années. L'Australie et l'Antarctique se sont séparés, ainsi que le Groenland et l'Amérique du Nord. L'océan Atlantique a continué à s'étendre avec l'éloignement des plaques médio-atlantiques. Les conditions de serre pendant le crétacé ont entraîné une élévation du niveau des mers et de vastes surfaces continentales ont été submergées.

Au cours des 2 derniers millions d'années, des périodes froides ont provoqué des glaciations et un abaissement du niveau des mers. Un pont continental s'est ainsi formé entre l'Asie et l'Amérique du Nord. Des humains et d'autres animaux ont migré entre ces deux continents antérieurement séparés. Une connexion entre l'Australie et l'Asie du sud-est a également permis des migrations. Il est important de savoir quand les masses terrestres ont été reliées et quelles espèces existaient à cette époque pour expliquer l'évolution de la diversité de la vie sur la Terre.

## La vie a changé la Terre

### La photosynthèse oxygénique est à l'origine de l'O<sub>2</sub> atmosphérique

L'atmosphère primitive contenait du CO<sub>2</sub> mais, au contraire de l'atmosphère moderne, elle manquait d'oxygène (O<sub>2</sub>). L'évolution de la photosynthèse a ajouté O<sub>2</sub> aux océans et à l'atmosphère, et cet environnement a conduit à l'évolution de la respiration cellulaire (figure 26.9).

La géologie montre un intervalle de 200 millions d'années entre l'origine de la photosynthèse et des concentrations notables d'O<sub>2</sub> dans l'environnement. Cet intervalle s'explique par la formation et la précipitation d'oxyde de fer dans l'océan. La majeure partie de l'O<sub>2</sub> libéré dans l'océan pendant les 200 premiers millions d'années a réagi avec le fer élémentaire pour former de l'oxyde de fer, empêchant une augmentation de la concentration de l'O<sub>2</sub> atmosphérique.

Avec l'augmentation d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère, certaines de ses molécules ont réagi avec le rayonnement ultraviolet (UV) du soleil et produit O<sub>3</sub> (ozone). La couche d'ozone protège la Terre des rayons ultraviolets, limite le taux de mutations et permet la vie sur la terre ferme.

### Les plantes sont-elles intervenues dans les glaciations ?

On pense de plus en plus que les plantes sont intervenues dans deux glaciations. La colonisation initiale de la terre ferme par les plantes a été suivie d'un refroidissement graduel et d'une brusque glaciation de 488 à 444 millions d'années, pendant l'ordovicien. Juste avant ce refroidisse-

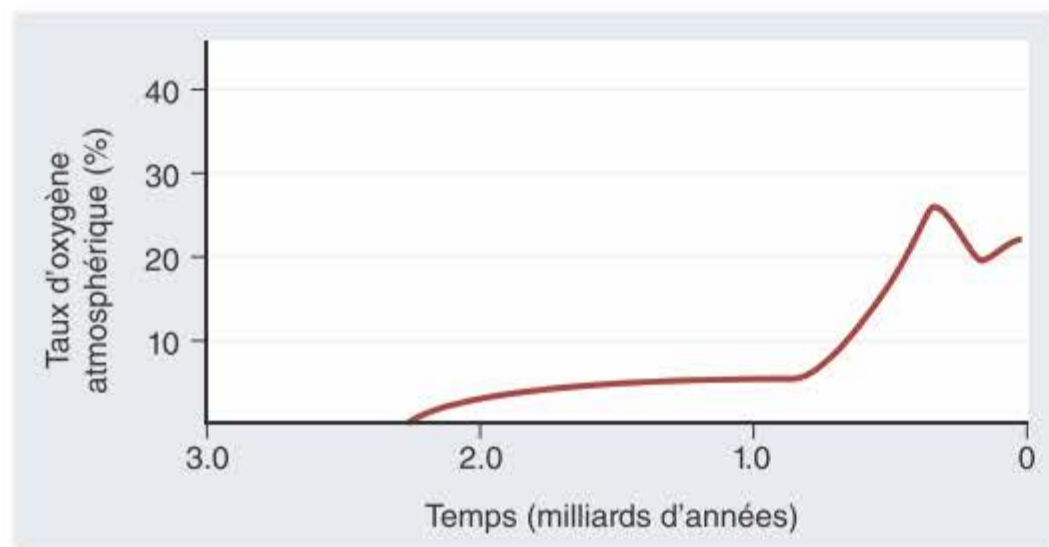


Figure 26.7 Taux de CO<sub>2</sub> au cours du temps.

ment, le taux de CO<sub>2</sub> était environ 20 fois supérieur aux concentrations actuelles, et les modèles climatiques prévoient la nécessité d'une diminution de 50 % pour déclencher une glaciation. L'érosion géologique pourrait expliquer en partie le refroidissement par la réduction du CO<sub>2</sub>, mais cette réduction ne pourrait suffire au déclenchement d'une glaciation.

Les premières plantes terrestres n'avaient pas de racines, mais des recherches effectuées sur leurs proches parents actuels montrent qu'elles libèrent des acides organiques capables d'augmenter la dégradation des roches. Cette érosion supplémentaire causée par les plantes a pu accélérer la diminution du CO<sub>2</sub> et de la température, mais ce serait encore insuffisant pour déclencher une glaciation. La proposition la plus convaincante est que le phosphore, élément indispensable pour la croissance des plantes, a été libéré des roches par l'érosion et est arrivé dans l'océan, où il a permis un développement très important des algues. La croissance rapide des algues photosynthétiques a abaissé le CO<sub>2</sub> atmosphérique et déclenché la glaciation. L'augmentation du phosphore dans les roches sédimentaires de cette époque est en faveur de cette conclusion. Tout le système a retrouvé son équilibre après la libération initiale du phosphore et les plantes ont commencé à recycler le phosphore du sol, réduisant le lessivage plus important dans les milieux aquatiques.

Une seconde glaciation a coïncidé avec la diversification des plantes vasculaires, de 400 à 360 millions d'années, pendant le dévonien. Le système racinaire important de ces plantes a augmenté la désagrégation des roches et abaissé le niveau de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les racines des plantes produisent les mêmes acides organiques que les plantes terrestres primitives sans racines, libérant des éléments essentiels comme le phosphore. La colonisation de la Terre par les plantes vasculaires a été suivie d'un refroidissement global et d'une glaciation.

Les glaciations induites par les plantes n'ont pas seulement changé la Terre ; elles ont aussi affecté le reste de la vie. Une glaciation entraîne souvent un abaissement du niveau des mers, lui-même responsable de l'extinction de nombreuses espèces marines.

### Synthèse 26.4

Les changements du climat, de l'atmosphère et de la localisation des continents ont entraîné la diversification de la vie et conduit à des extinctions à la suite des glaciations. En même temps, la vie a modifié le système terrestre : terre ferme, eau et atmosphère. Les facteurs abiotiques et biotiques peuvent tous deux entraîner une diminution du taux de CO<sub>2</sub>, qui peut précipiter une glaciation.

- Comparez les événements qui ont déclenché des glaciations à la fin du protérozoïque et les glaciations du début de l'ordovicien.

## 26.5 Modifications constantes de la vie sur Terre

### Objectifs

1. Comparer l'évolution du système endomembranaire et des mitochondries.
2. Envisager les types de spécialisation nécessaires aux organismes pluricellulaires.

En partant d'une cellule isolée pendant l'éon archéen, la vie a évolué en trois clades monophylétiques, ou domaines : bactéries, archées et eucaryotes. Parmi les eucaryotes, on a identifié six supergroupes sur la base de leurs relations phylogénétiques : excavates (organismes sans mitochondries typiques), chromalveolés (organismes avec chloroplastes provenant d'une endosymbiose secondaire), archéoplastides (organismes avec chloroplastes et photosynthèse), rhizariens (organismes avec de minces pseudopodes servant aux déplacements), amœbozoaires (organismes avec des pseudopodes courts servant aux déplacements) et opisthocontes (champignons, animaux ancestraux et animaux) (figure 26.8). Nous envisagerons ici les grands événements évolutifs à l'origine de cette incroyable diversité de la vie qui a évolué pour répondre à un environnement sans cesse changeant.

## Le cloisonnement des cellules a permis l'émergence des eucaryotes

Pendant un milliard d'années au moins, les bactéries et les archées ont dominé la Terre. Il n'y avait aucun autre type d'organisme pour les manger ou pour entrer en compétition avec eux, et leurs minuscules cellules sont à l'origine des fossiles les plus anciens au monde. Les archées sont plus proches des eucaryotes et peuvent se retrouver dans des environnements extrêmes pour les standards actuels : niveaux élevés de température, pression et salinité. Bactéries et archées se distinguent des eucaryotes par l'absence de cloisonnement de leurs cellules.

Le troisième grand domaine, celui des eucaryotes, apparaît dans les dépôts fossiles beaucoup plus tard, il y a seulement environ 1,5 milliard d'années. Mais, en dépit des ressemblances métaboliques entre les cellules eucaryotes et procaryotes, leur structure et leur fonctionnement leur ont permis de s'agrandir, puis d'aboutir à une forme de vie pluricellulaire.

### Évolution du système endomembranaire

La caractéristique des eucaryotes est une organisation cellulaire complexe, illustrée par un vaste système endomembranaire qui divise la cellule en compartiments fonctionnels, y compris le noyau (figure 26.9, voir aussi chapitre 4). L'évolution d'une enveloppe nucléaire, inexistante chez

les bactéries et les archées, participe à la plus grande complexité des eucaryotes. Chez les eucaryotes, les transcrits d'ARN de l'ADN nucléaire sont transformés et transportés au travers de l'enveloppe nucléaire dans le cytosol, où a lieu la traduction. La séparation physique de la transcription et de la traduction ajoute des niveaux de contrôle au mécanisme de l'expression des gènes.

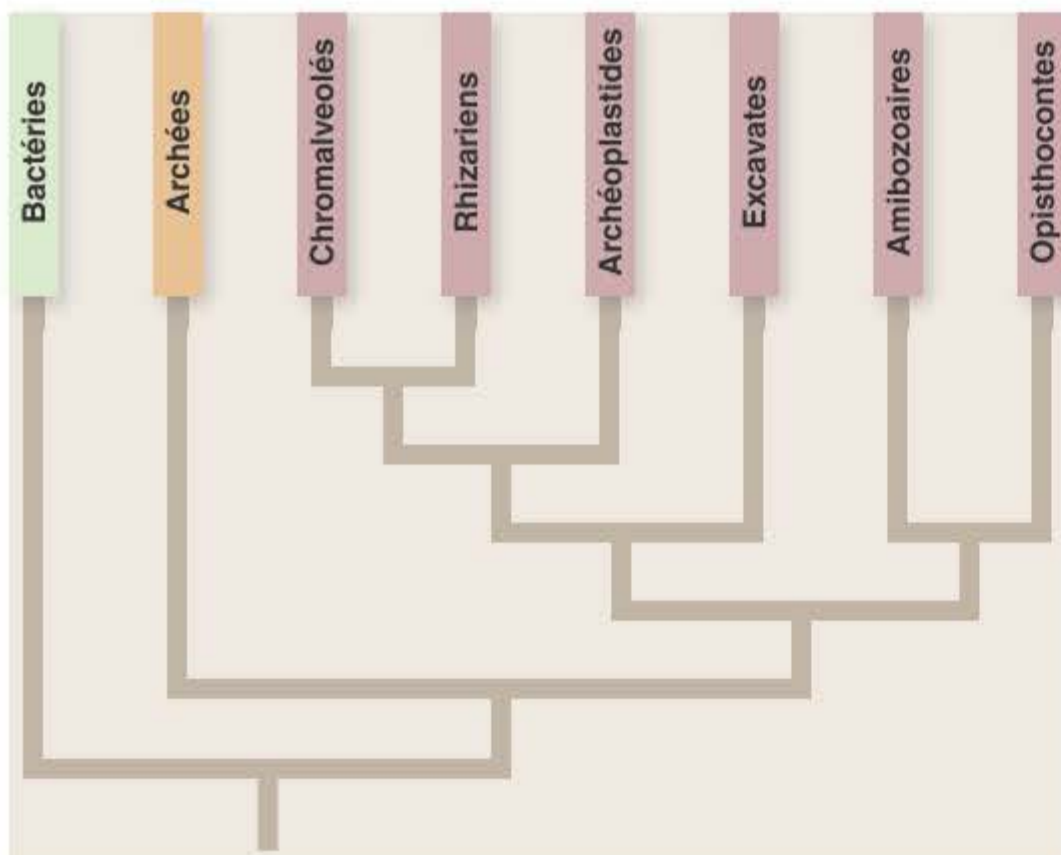
L'appareil de Golgi et le réticulum endoplasmique sont des innovations essentielles qui facilitent le transport intracellulaire et la localisation des protéines dans des régions spécifiques de la cellule. Ces systèmes membranaires, ainsi que l'enveloppe nucléaire, proviennent de l'invagination de la membrane cellulaire. Tous les compartiments cellulaires ne dérivent cependant pas du système endomembranaire.

### Endosymbiose et origine des eucaryotes

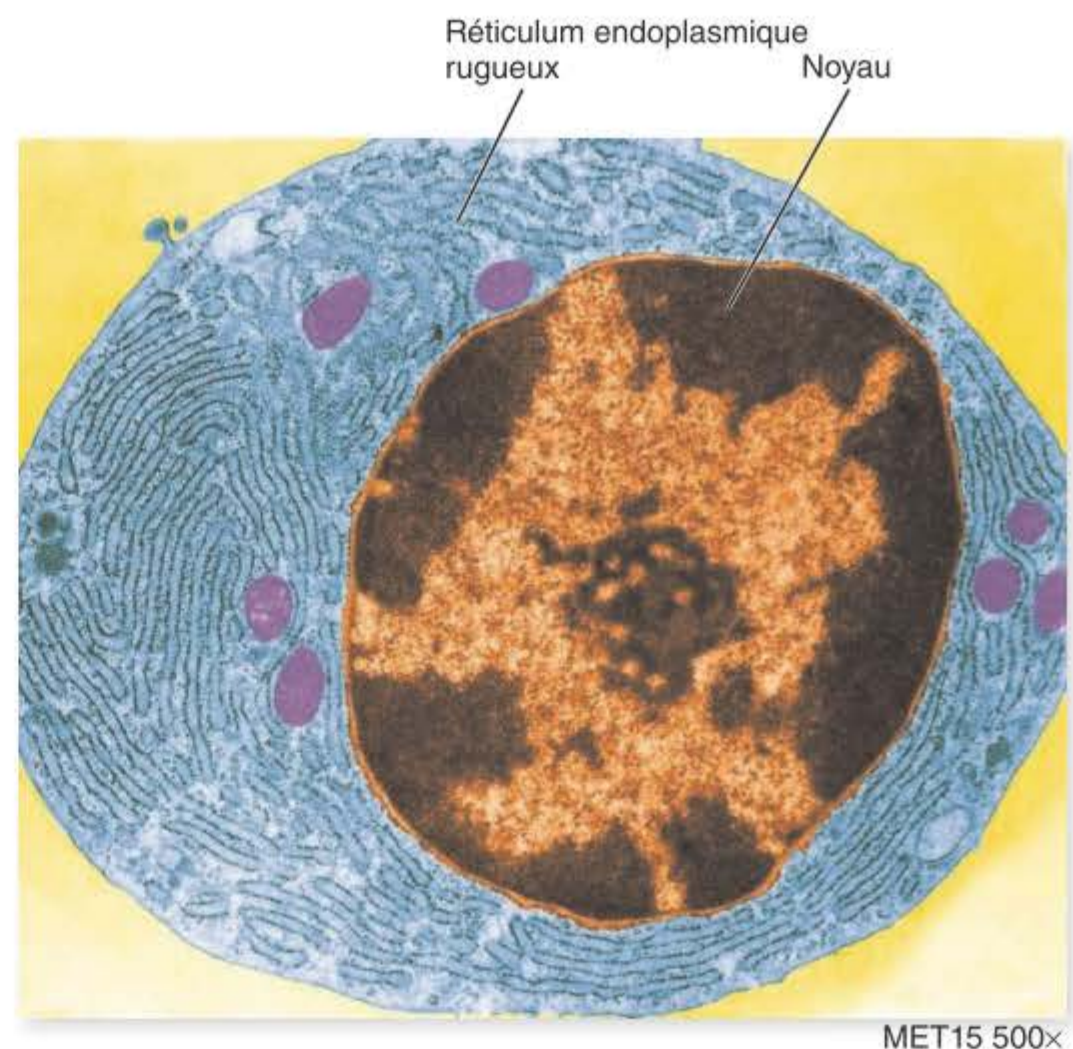
À quelques exceptions près, les cellules eucaryotes modernes possèdent des organites producteurs d'énergie, les *mitochondries*, et les cellules eucaryotes photosynthétiques ont des *chloroplastes*, organites collecteurs de l'énergie. On suppose que les mitochondries, comme les chloroplastes, sont entrées dans des cellules eucaryotes primitives par **endosymbiose**, processus décrit en détail au chapitre 29.

Les mitochondries descendent d'organismes apparentés aux bactéries sulfureuses pourpres et aux *Rickettsia* parasites, incorporés aux cellules eucaryotes au début de l'histoire de ce groupe. Les chloroplastes dérivent de cyanobactéries. Les chloroplastes des algues rouges et vertes proviennent directement de l'ingestion d'une cyanobactérie. Les algues brunes ont très probablement ingéré des algues rouges qui sont devenues leurs chloroplastes (figure 26.10).

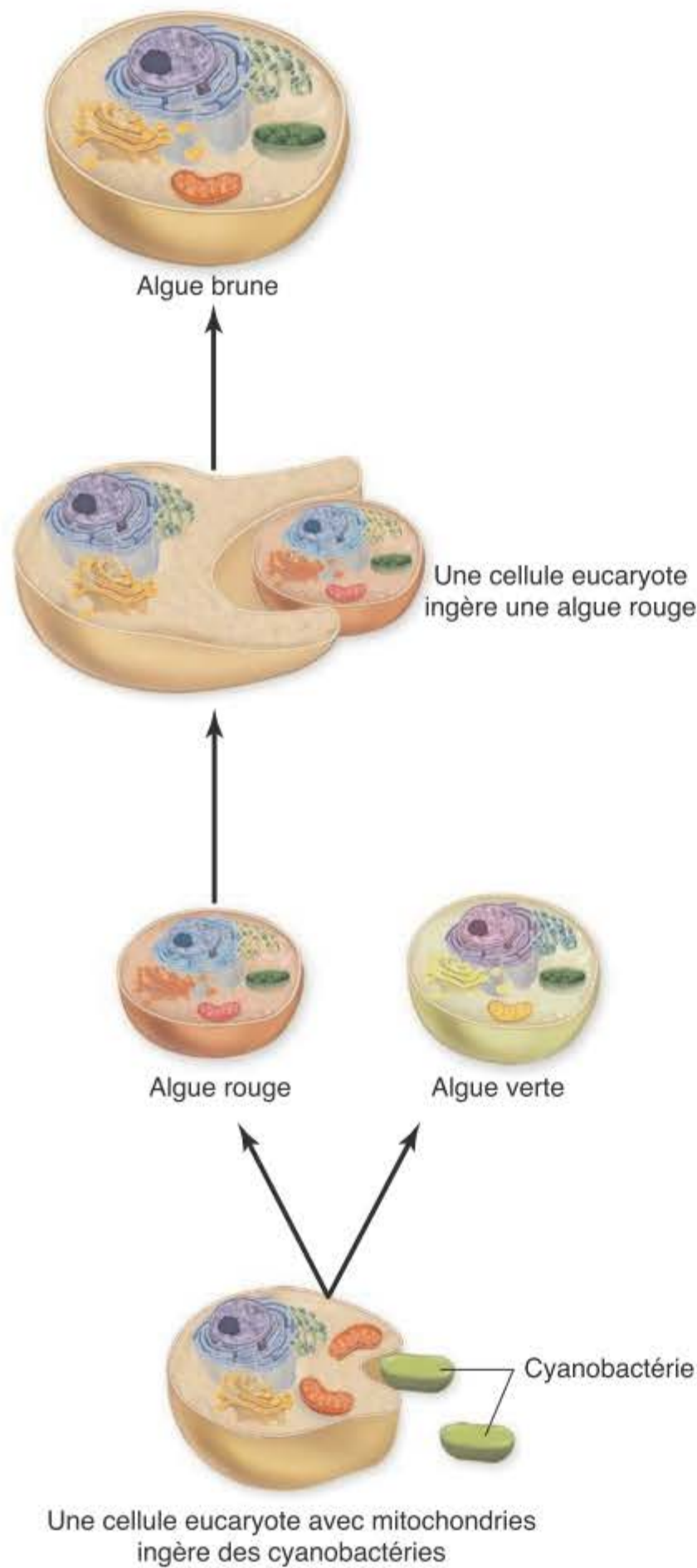
La phylogénétique moléculaire indique que les eucaryotes sont apparus au début du protérozoïque et se sont diversifiés plus tard pendant cet éon. Des microfossiles du protérozoïque confirment l'existence d'eucaryotes il y a 1,5 milliard d'années.



**Figure 26.8** On a identifié six supergroupes dans le domaine des eucaryotes, un des trois domaines existant sur la Terre.



**Figure 26.9** Cloisonnement cellulaire. Ces organismes unicellulaires complexes (des paramécies) sont considérés comme des protistes. Des levures, colorées en rouge dans cette photo, ont été consommées et enfermées dans des sacs délimités par une membrane : ce sont des vacuoles digestives.



**Figure 26.10** Tous les chloroplastes sont monophylétiques. Les mêmes cyanobactéries ont été ingérées par plusieurs hôtes qui sont les ancêtres des algues rouges et vertes. Les algues brunes ont le même ADN chloroplastique ancestral, mais il provient probablement de l'ingestion d'algues rouges.

### La pluricellularité conduit à la spécialisation des cellules

L'organisation unicellulaire a eu un succès extraordinaire, les procaryotes et eucaryotes unicellulaires représentant environ la moitié de la biomasse terrestre. Mais une cellule unique a des limites, même avec la spécialisation découlant de la présence des compartiments chez les eucaryotes. L'évolution de la pluricellularité a permis aux organismes de trouver de nouvelles adaptations à leur environnement par la différenciation de types cellulaires en tissus et organes.

Les organismes vraiment pluricellulaires, où les activités des cellules individuelles sont coordonnées et les cellules elles-mêmes sont en contact, n'existent que chez les eucaryotes et c'est une de leurs principales caractéristiques. Les bactéries et beaucoup d'eucaryotes unicellulaires forment des associations coloniales avec de nombreuses cellules,

mais ces cellules sont peu différenciées et leur fonctionnement est peu coordonné (figure 26.13).

La pluricellularité est apparue indépendamment dans des supergroupes eucaryotes différents. Par exemple, elle est apparue indépendamment chez les algues rouges, brunes et vertes. Une lignée d'algues vertes pluricellulaires est l'ancêtre des plantes (voir chapitre 29). Un autre ancêtre unicellulaire des opisthocontes a donné naissance à tous les animaux pluricellulaires.

La pluricellularité implique une connexion et une communication entre les cellules. Bien que toutes les cellules possèdent une information génétique identique, l'expression des gènes diffère selon les cellules pour permettre leur spécialisation. Des mécanismes ont évolué pour permettre l'expression des gènes et la différenciation des cellules.

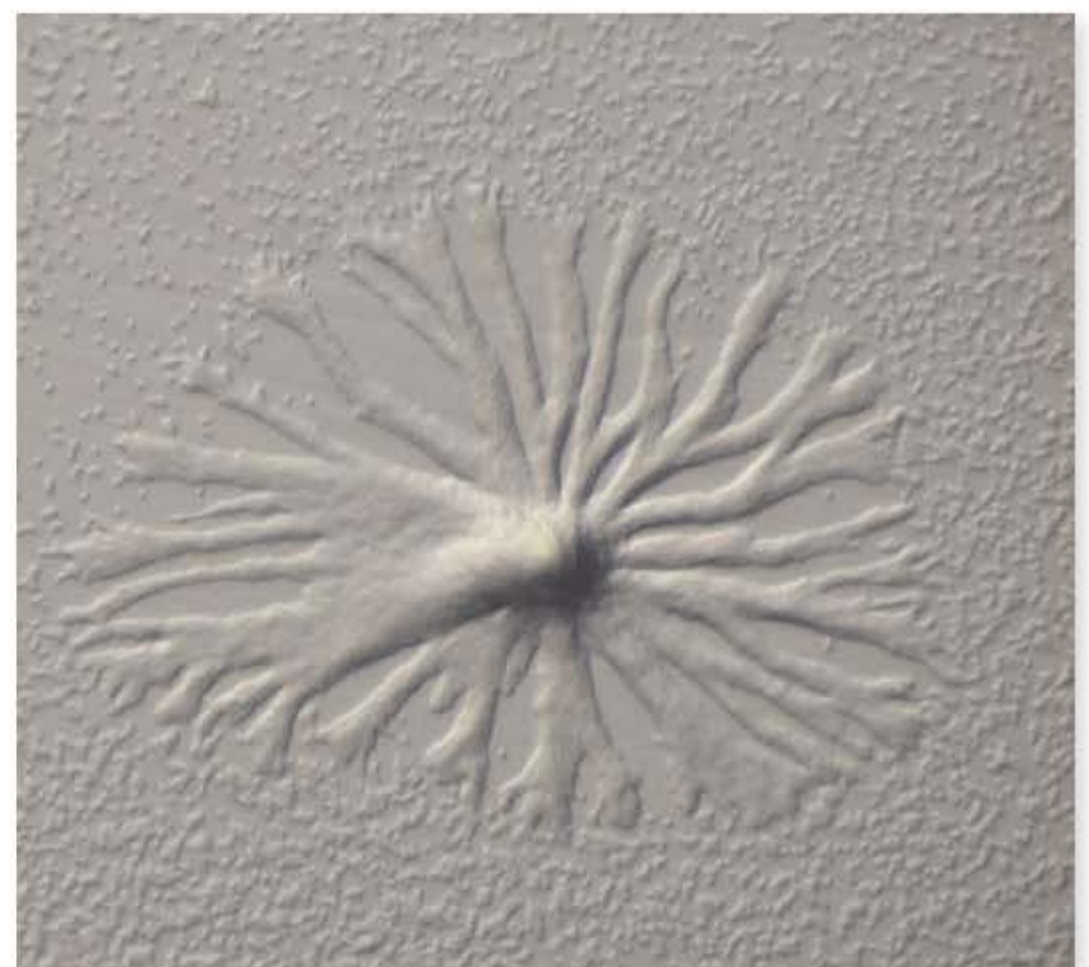
### La reproduction sexuée favorise la diversité génétique

Une autre caractéristique essentielle des espèces eucaryotes est la reproduction sexuée. Il existe des échanges de matériel génétique chez les bactéries, mais il ne s'agit certainement pas d'un mécanisme régulier et prévisible comparable à la sexualité des eucaryotes. La reproduction sexuée permet une augmentation de la diversité génétique grâce à la méiose et au crossing-over, comme nous l'avons vu au chapitre 13.

Dans certains supergroupes eucaryotes, la reproduction sexuée est seulement occasionnelle. Les premiers eucaryotes étaient probablement haploïdes ; les diploïdes semblent être apparus indépendamment plusieurs fois par fusion de cellules haploïdes qui se sont ensuite divisées par mitose.

### La diversification a été rapide au cambrien

Des innovations évolutives sont apparues dans les cellules alors que la vie était encore aquatique : elles sont à l'origine de l'extraordinaire diversité de la vie terrestre d'aujourd'hui. À la fin du protérozoïque et de la troisième glaciation, le paléozoïque a débuté par la période cambrienne, qui s'étend entre 542 et 488 millions d'années. Ce fut une période



**Figure 26.11** Association de cellules de *Dictyostelium discoideum* en organisme colonial.



**Figure 26.12 Fossile de l'explosion cambrienne.** Un nombre particulièrement élevé de fossiles à corps mou, comme cet exemplaire de *Marella splendens* du Burgess Shale dans le parc national Yoho, en Colombie Britannique, sont la preuve d'une diversification rapide de la vie animale pendant cette période.

d'expansion extrêmement rapide de la vie, l'explosion cambrienne. Nous connaissons bien cette période parce que, non seulement les portions résistantes de ces organismes, mais aussi les parties molles, ont été conservées dans les fossiles de trois sites de Colombie Britannique, Groenland et Chine (figure 26.12).

Pendant 3 milliards d'années, à l'exception de quelques groupes d'algues, la vie est restée unicellulaire. Pendant la période aboutissant à l'explosion cambrienne sont apparus les premiers animaux pluricellulaires. Au cours des 50 millions d'années suivants, les ancêtres de presque tous les groupes d'animaux ont évolué.

## Des innovations majeures ont permis les déplacements sur la terre ferme

Le rayonnement cambrien se limitait à l'océan. Peu après, des plantes, puis des animaux, ont colonisé des environnements terrestres. L'évolution de la photosynthèse a entraîné l'apparition d'une atmosphère riche en  $O_2$ , puis d'une couche d'ozone qui protège des rayons UV les organismes vivant en surface.

Pour réussir, le passage d'un environnement liquide à la terre ferme supposait des innovations empêchant la dessiccation et l'accès à l'eau. De nouvelles stratégies étaient aussi nécessaires pour les échanges gazeux. Chez les animaux, les poumons étaient plus efficaces que les branchies ou les échanges de gaz au travers de la peau humide. Les plantes ont acquis des stomates, ouvertures contrôlées à la surface de la plante, pour faciliter les échanges de gaz et empêcher les pertes d'eau. On parlera de ces grandes innovations et d'autres encore dans les chapitres 27 à 35.

### Synthèse 26.5

L'histoire de la vie sur la Terre est l'histoire de la diversification des cellules et des organismes. Les cellules eucaryotes sont fortement cloisonnées par des systèmes endomembranaires et elles ont acquis des mitochondries et des chloroplastes par endosymbiose. La pluricellularité a conduit à la spécialisation des cellules ; la méiose et la reproduction sexuée ont augmenté la diversité génétique. Des explosions de spéciation rapide, ainsi que des extinctions périodiques, ont abouti à la diversité de la vie marine et terrestre qui existe aujourd'hui.

- Analysez les innovations évolutives précédant le cambrien qui peuvent avoir contribué au rayonnement rapide.

## Résumé

### 26.1 Les temps anciens

**La Terre s'est modifiée au cours des temps géologiques (figure 26.1).**

Pendant les 4,6 milliards d'années de son histoire, la Terre a subi des changements extrêmes de température correspondant à des changements de la concentration en  $CO_2$ . Les continents se sont formés, se sont réunis en supercontinents et se sont de nouveau séparés plusieurs fois. L'histoire de la vie s'est principalement déroulée pendant les 12 derniers pour cent de l'histoire de la Terre.

### 26.2 Origine de la vie

**Plusieurs origines sont possibles pour les premières molécules organiques.**

Certaines molécules organiques peuvent avoir une origine extraterrestre, mais la plupart se sont plus vraisemblablement formées dans l'environnement réducteur de la Terre primitive.

**Les voies métaboliques peuvent être apparues de diverses façons.**

Nous ne savons pas avec certitude comment sont apparues les voies métaboliques. Les organismes autotrophes ont acquis des moyens permettant d'incorporer les molécules inorganiques de l'environnement dans des molécules organiques. Au début, l'utilisation de l'énergie n'avait pas besoin d'enzymes.

**Les premières formes de vie étaient des cellules isolées.**

À une certaine époque, une vie cellulaire simple a évolué grâce à la formation de membranes, aux activités métaboliques et à l'autoréplication.

### 26.3 Preuve d'une vie primitive

**Des fossiles montrent que la vie a pu apparaître il y a 3,2 milliards d'années.**

On a étudié au microscope électronique à balayage des microfossiles avec parois organiques et on les a datés à 3,2 milliards d'années au moins. Des stromatolites de 2,7 milliards d'années, dépôts sédimentaires de micro-organismes, ont apporté des arguments plus certains.

*Les données isotopiques montrent que la fixation du carbone est un processus ancien.*

La datation par le carbone a montré que des organismes ont fixé le carbone grâce à une forme primitive de photosynthèse il y a 3,8 milliards d'années.

*Certains glucides découverts dans les roches anciennes peuvent avoir une origine biologique.*

On a identifié des molécules organiques d'origine clairement biologique, comme des lipides, dans des roches d'Australie vieilles de 2,7 milliards d'années.

## 26.4 Modifications de la Terre

*Le climat de la Terre a toujours été changeant.*

La Terre s'est refroidie dès sa formation, mais des changements extrêmes de température, liés à des modifications du taux de CO<sub>2</sub>, ont été associés à des glaciations, entre autres trois glaciations qui ont impliqué l'ensemble du globe. Les glaciations peuvent entraîner une extinction de masse et interviennent dans le cours de l'évolution.

*Les modifications de l'atmosphère s'expliquent par des changements géologiques et par les organismes vivants.*

La décomposition des roches dans des climats chauds et humides, ainsi qu'une extension des zones humides due à la rupture des supercontinents, ont entraîné la séquestration du CO<sub>2</sub> dans les océans. Dans certains cas, la chute du taux de CO<sub>2</sub> peut suffire au déclenchement des glaciations.

*L'évolution a été influencée par le déplacement des continents.*

La tectonique des plaques explique un déplacement graduel des continents qui peut modifier le climat et influencer la faculté, pour les populations, de se mélanger et de se croiser.

*La vie a changé la Terre.*

Les plantes sont intervenues dans deux glaciations en réduisant le taux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par la photosynthèse et par la libération de phosphore, élément essentiel, à partir des roches.

## 26.5 Modifications constantes de la vie sur Terre

*Le cloisonnement des cellules a permis l'émergence des eucaryotes.*

Les cellules eucaryotes ont acquis des compartiments qui améliorent leur fonctionnement, d'une part par des invaginations de membranes à l'origine des systèmes endomembranaires et, d'autre part, par endosymbiose (figure 26.10).

*La pluricellularité conduit à la spécialisation des cellules.*

Plusieurs groupes d'eucaryotes sont devenus pluricellulaires indépendamment.

*La reproduction sexuée favorise la diversité génétique.*

L'évolution de la méiose a augmenté la diversité génétique disponible pour la sélection naturelle.

*La diversification a été rapide au cambrien.*

Le cloisonnement, la pluricellularité et la reproduction sexuée sont à la base de l'évolution rapide de la vie animale au cours du cambrien (542-488 millions d'années).

*Des innovations majeures ont permis les déplacements sur la terre ferme.*

Le passage à un environnement terrestre a impliqué des adaptations permettant d'éviter la dessiccation, d'accéder à l'eau et de faciliter les échanges gazeux dans un environnement sec.



## Questions

### COMPRÉHENSION

- L'expérience de Miller et Urey a prouvé que
  - la vie est apparue sur Terre.
  - des molécules organiques ont pu apparaître dans l'atmosphère primitive.
  - le matériel génétique primitif sur la planète était de l'ADN.
  - l'atmosphère primitive contenait de grandes quantités d'oxygène.
- La tectonique des plaques peut intervenir dans
  - les volcans et les tremblements de terre.
  - l'origine des supercontinents.
  - l'augmentation de l'érosion et de la séquestration du CO<sub>2</sub>.
  - Tous ces choix sont corrects.
- Parmi les propositions suivantes, lesquelles sont fausses ou correctes ?
  - Les algues brunes et rouges ne sont pas proches phylogénétiquement.
  - Les chloroplastes des algues brunes et rouges sont monophylétiques.
  - Les chloroplastes des algues brunes proviennent d'une inclusion d'algues vertes (endosymbiose).
  - Aucune de ces propositions n'est fausse.

- Quelle a été la première étape de l'évolution des eucaryotes ?
  - L'endosymbiose et l'évolution des mitochondries.
  - L'endosymbiose et l'évolution des chloroplastes.
  - Le cloisonnement et la formation du noyau.
  - L'apparition d'organismes pluricellulaires.
- Les données fossiles montrent que
  - la vie est apparue il y a 4 milliards d'années.
  - la vie existe peut-être depuis 3,5 milliards d'années, mais certainement depuis 3,2 milliards d'années.
  - l'explosion cambrienne a été à l'origine de la vie.
  - les plantes ont joué un rôle important dans les glaciations.

### APPLICATIONS

- Une glaciation globale est peu probable si
  - un supercontinent s'est formé près de l'équateur et les pluies sont abondantes.
  - des millions d'hectares de forêt sont déboisés.
  - de grandes quantités de phosphore ont accès aux milieux aquatiques et océaniques.
  - les populations d'algues se développent rapidement dans l'océan.

2. Nous ne savons pas comment la vie est apparue sur la Terre, mais ceci s'est probablement produit :
  - a. Toutes les molécules organiques sont arrivées sur la Terre par les météorites.
  - b. Des taux élevés en oxygène étaient indispensables pour la glycolyse.
  - c. Des lipides se sont organisés en membranes cellulaires.
  - d. Des molécules organiques se sont formées dès que les températures ont atteint des niveaux modérés, comparables à ceux d'aujourd'hui.
3. Quels arguments pourraient vous convaincre que la vie est déjà apparue il y a 3,2 milliards d'années ?
  - a. Vous étudiez un microfossile au microscope électronique à balayage et il ressemble à une cellule.
  - b. Une bonne photo au microscope électronique à transmission d'une cellule fossile montre des compartiments cellulaires, y compris peut-être un noyau.
  - c. La datation au potassium d'un fossile contenant peut-être une cellule indique que ce fossile date de 3,2 milliards d'années.
  - d. Grâce à la microscopie électronique à transmission et à balayage, vous avez la preuve d'une matière carbonée dans ce qui paraît être une paroi cellulaire d'un fossile daté de 3,2 milliards d'années par les isotopes.
4. À quelle époque pensez-vous que l'isolement géographique a été particulièrement important pour l'évolution de la vie ?
  - a. Au cambrien.
  - b. À la fin de l'ère paléozoïque.
  - c. Au début de l'ère cénozoïque.
  - d. a et b sont corrects.
5. Les chloroplastes des algues brunes
  - a. ont un chromosome avec une séquence d'ADN très différente de celui d'une algue rouge.
  - b. sont entourés de quatre membranes.
  - c. sont entourés de deux membranes.
  - d. ont un chromosome dont la séquence d'ADN ressemble à celle des algues rouges, mais très différente de celle des algues vertes.

## RÉVISION

1. Les plantes vasculaires ont stocké de grandes quantités de CO<sub>2</sub> par la photosynthèse quand elles se sont répandues sur la terre ferme et elles ont provoqué une glaciation. Que pensez-vous de l'hypothèse selon laquelle la même glaciation s'est produite quand les premières plantes ont colonisé la terre ferme ? N'oubliez pas de voir si la photosynthèse de ces nouvelles espèces pouvait à elle seule entraîner une glaciation.
2. Résumez ce que vous avez appris dans ce chapitre, analysez les nombreux effets possibles de la collision de deux plaques pour l'évolution de la vie sur la Terre.
3. Analysez les facteurs qui peuvent avoir contribué à l'explosion cambrienne.