

Autour de 4 570 millions d'années...

LE PREMIER MILLION D'ANNÉES DU SOLEIL: Le système solaire en gestation

Il y a 4,57 milliards d'années, quelque part dans notre galaxie, *la Voie Lactée*, une condensation de gaz et de poussières au sein d'un nuage interstellaire s'effondre sous l'influence de la gravitation.

En son centre se forme un "noyau" embryonnaire à l'origine de notre future étoile, le Soleil. Le reste de cette condensation se transforme en une enveloppe relativement isolée qui tombe plus lentement sur ce noyau via un disque circumstellaire (qui entoure l'étoile).

En cent mille ans, un *protosoleil* est né.

Cet astre en devenir subit ensuite une véritable métamorphose : en un million d'années, son enveloppe devient progressivement plus ténue, l'étoile centrale "grossit" aux dépens du disque circumstellaire, et un phénomène d'éjection de matière ("*jet bipolaire*") se développe.



L'étoile jeune HH30 dans la constellation du Taureau. Notre Soleil a dû ressembler à une telle étoile moins d'un million d'années après sa naissance. On voit clairement le "disque d'accrétion" à la forme évasée, et le "jet bipolaire" quittant symétriquement l'étoile. Pour donner l'échelle, le rayon du disque est environ 4 fois plus grand que le rayon du système solaire actuel. (© Cliché Hubble Space Telescope, NASA).

Entre 4 570 et 4 560 millions d'années...

LES 10 PREMIERS MILLIONS D'ANNÉES DU SOLEIL : La naissance du système solaire

Le *disque circumstellaire* subit à son tour des transformations importantes.

Les grains de poussière qu'il contient vont, par des mécanismes encore très mal compris, grossir rapidement jusqu'à former des "boules" de 1 km de rayon que l'on appelle les *planétésimaux*.

Ces derniers entrent à leur tour en collision les uns avec les autres et donnent naissance à deux grandes catégories de corps très différents existant toujours dans le système solaire actuel :

- les *planètes géantes* d'une part, localisées dans les régions extérieures des disques où la glace domine,
- les *météorites*, d'autre part qui sont les débris résultant des collisions.

Cette phase, qui correspond à la disparition du disque, ne dure pas plus de quelques millions d'années.

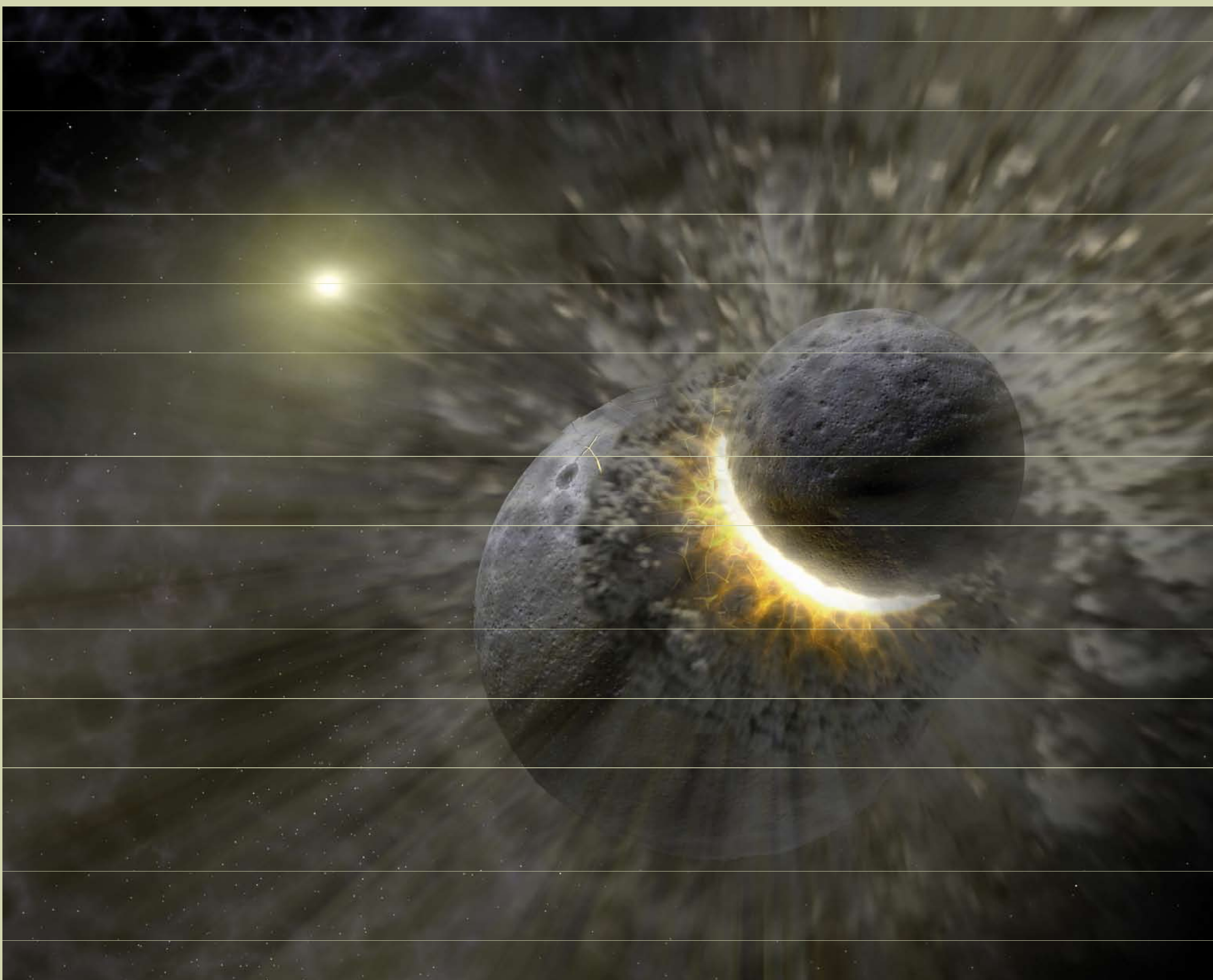


© MNHN, Paris

Fragment de la météorite d'Allende. Cette météorite de 250 kg, tombée en 1969 près du village d'Allende au Mexique, a contenu au moment de la formation du système solaire des éléments radioactifs dont on retrouve les traces aujourd'hui. Certaines de ces traces ont permis de dater très précisément l'âge du système solaire : 4,567 milliards d'années. (© Muséum National d'Histoire Naturelle)

Entre 4 570 et 4 500 millions d'années...

LES 70 PREMIERS MILLIONS D'ANNÉES DU SOLEIL : La formation des planètes rocheuses



Billard cosmique: la formation de la Terre et de la Lune. Pendant plusieurs dizaines de millions d'années après sa naissance, de nombreuses collisions, notamment entre objets de masse planétaire, ont agité le système solaire. Certains débris ont pu rester au moins partiellement en orbite autour de l'un des objets et se rassembler à nouveau pour former un nouveau corps satellite du premier: c'est ainsi que l'on comprend aujourd'hui la naissance de la Lune, environ 70 millions d'années après le début de la formation du système solaire. [Dessin d'artiste © NASA]

Avec l'aide des perturbations gravitationnelles des planètes géantes, une deuxième catégorie de corps va se former, beaucoup plus lentement, à partir de la multitude de planétésimaux encore présents.

Il s'agit cette fois des planètes "rocheuses" ou "telluriques", telles la Terre, Mercure, Vénus et Mars.

Des collisions de plus en plus rares, mais tout aussi violentes, se poursuivent ainsi pendant des dizaines de millions d'années, et c'est notamment une collision entre la jeune Terre et un corps de la taille de Mars, qui a donné naissance à la Lune.

Entre 4 560 et 4 500 millions d'années...

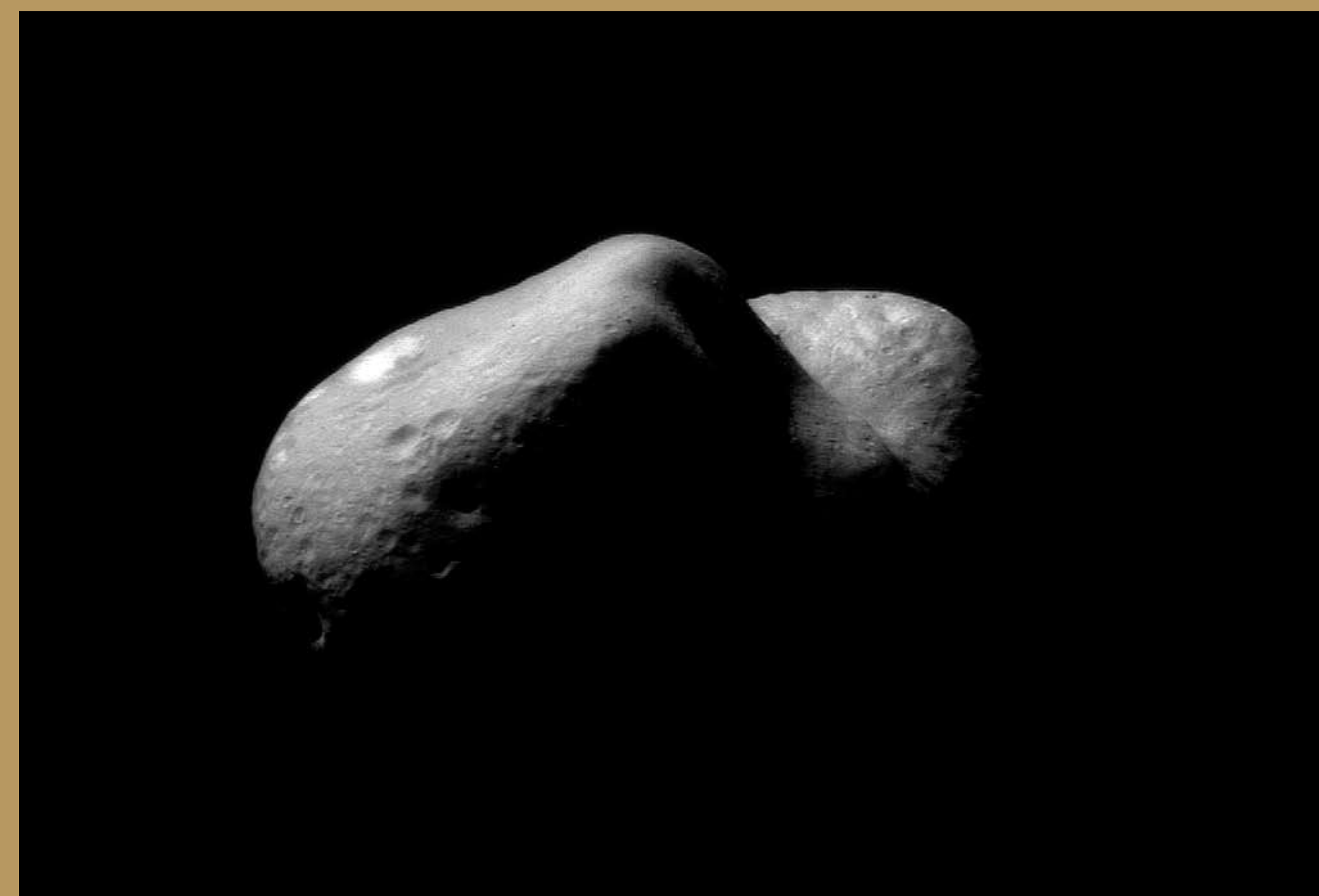
APPORT DE L'EAU SUR TERRE :

Le rôle des comètes, des astéroïdes et des météorites

L'eau a été apportée sur Terre à la fin ou immédiatement après la formation des planètes lorsque la planète était suffisamment refroidie.

Les *comètes* constituées de glace et de poussière pourraient en être l'un des vecteurs. Toutefois, leur composition isotopique (Hydrogène/Deutérium) indique que 20% au plus de l'eau terrestre serait d'origine cométaire.

Il semble donc que l'eau des océans aurait été apportée soit durant les phases finales d'accrétion par des planétésimaux provenant de la *ceinture externe d'astéroïdes*, soit un peu plus tard par des météorites via le bombardement météoritique postérieur à la formation de la Terre. Les *micrométéorites* ont aussi pu jouer un rôle.

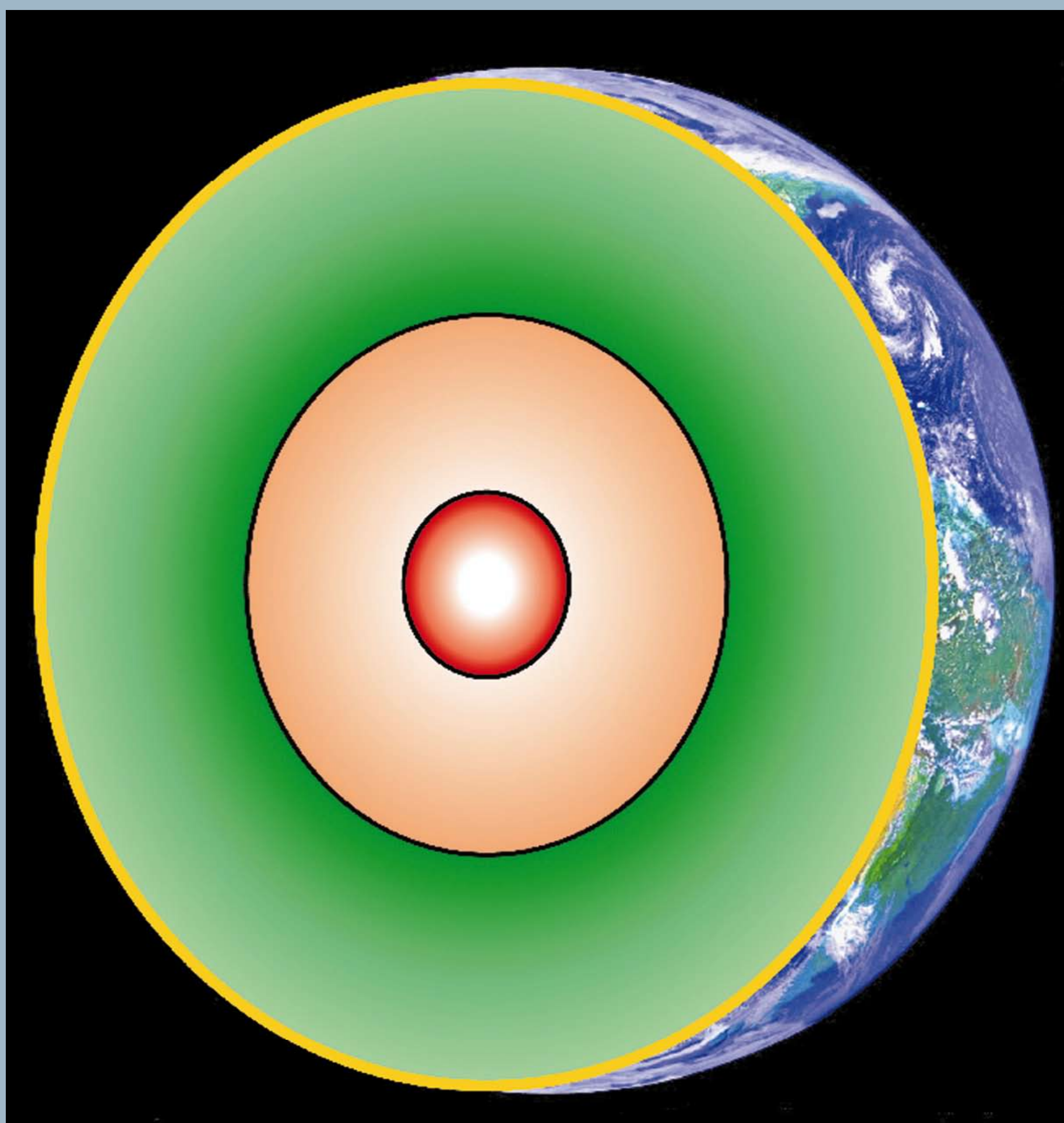


L'astéroïde appelé 433 Eros a été survolé le 19 septembre 2000 par la sonde américaine "NEAR-Shoemaker". Ce "petit corps" du système solaire (33 km de long) fait aujourd'hui partie de la "ceinture d'astéroïdes", qui en comprend des millions. De tels astéroïdes, alors situés suffisamment loin du Soleil pour contenir beaucoup de glace, ont probablement participé à la formation de la Terre, lui apportant jusqu'à un tiers de son eau, suivant de récentes estimations. D'autres corps comme les comètes ou les météorites ont pu également contribuer à l'apport d'eau sur la Terre, mais de façon minoritaire.

Autour de 4 500 millions d'années...

DÉBUT DE LA DIFFÉRENCIATION TERRESTRE :

Formation du noyau, du manteau et d'un océan magmatique



Coupe schématique de la Terre solide actuelle montrant sa structure en couches concentriques : rouge foncé = noyau interne solide; rose orange = noyau externe liquide; vert = manteau; jaune = croûtes océanique et continentale.

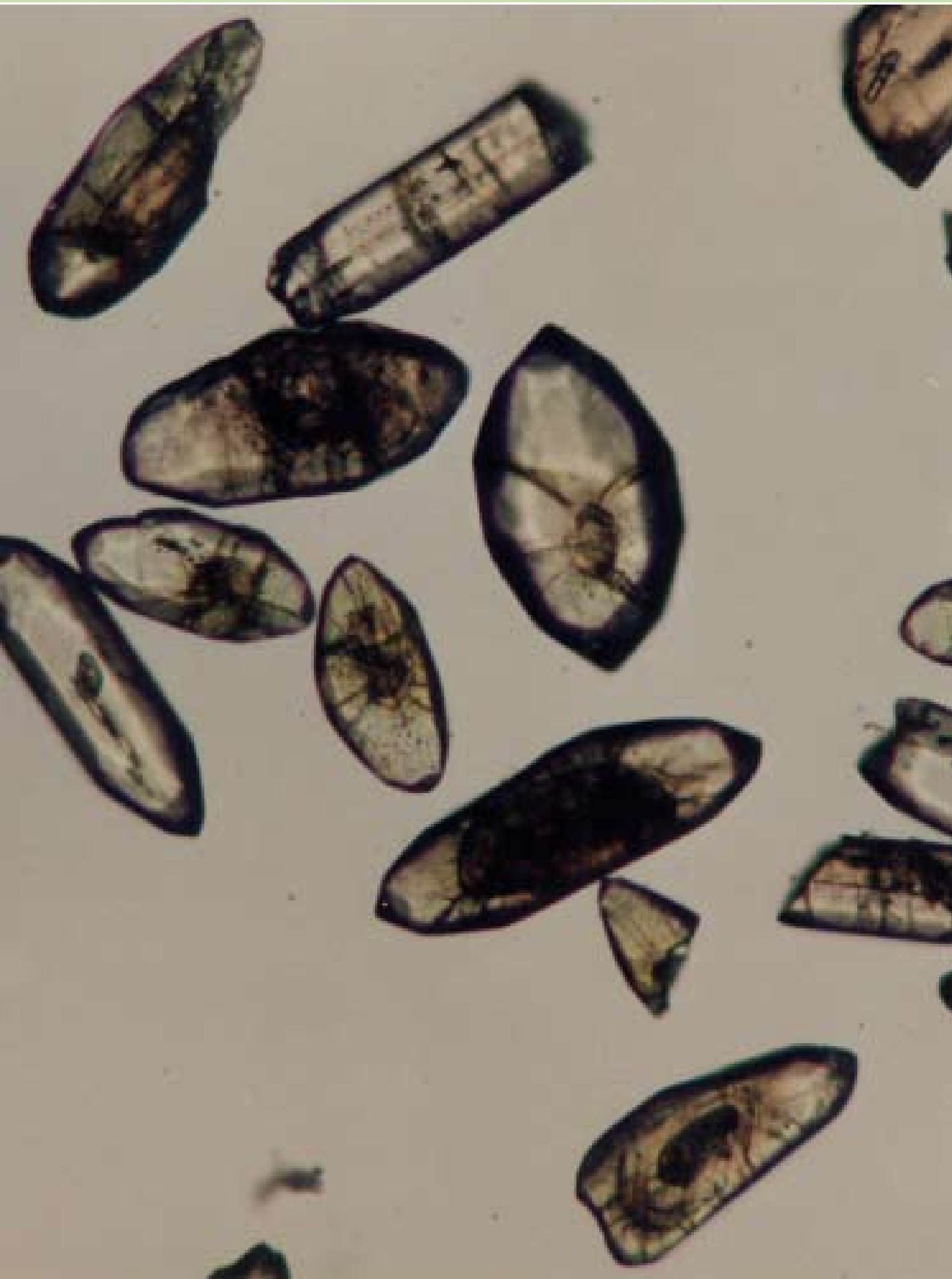
L'accrétion planétaire au cours des 70 premiers millions d'années du système solaire a conduit à la formation d'une Terre homogène. Aux environs de 4 500 Ma, soit moins de 70 millions d'années après le début de la formation de la Terre, le fer et le silicate se séparent : le fer plus lourd se concentre au centre de la planète, et forme le *noyau*; les silicates légers restent à la périphérie et forment le *manteau*.

La chaleur liée à la formation de la Terre, associée à celle résultant de la désintégration des éléments radioactifs très abondants, a pour conséquence de faire fondre toute la partie externe du manteau pour donner un océan *magmatique*.

La rotation d'un noyau interne solide dans un noyau externe liquide est à l'origine du *champ magnétique terrestre*, qui aujourd'hui encore protège la surface de la planète du vent solaire.

Autour de 4 400 millions d'années...

PREMIERS CONTINENTS ET PREMIERS OCÉANS : *Vers une terre potentiellement habitable ?*



Cristaux de zircon archéens semblables aux cristaux découverts à Jack Hills en Australie. Ces minéraux de formule (Zr SiO₄) qui se forment de préférence dans des magmas granitiques, sont très résistants à l'altération et contiennent aussi des éléments radioactifs tels que le thorium et l'uranium, qui permettent de les dater aisément. Ce sont d'excellents mémoires de l'histoire terrestre.

Compte tenu de la température élevée, l'eau une fois arrivée sur Terre, s'est d'abord vaporisée dans l'atmosphère, puis s'est ensuite condensée pour former les océans.

L'analyse des isotopes de l'oxygène de *cristaux de zircon* trouvés en Australie et âgés de 4 400-4 300 Ma indique la présence d'eau liquide à la surface de la planète il y a 4 400 Ma (océans ?).

Ces mêmes zircons démontrent aussi qu'une croûte continentale granitique stable existait à cette époque, soit moins de 200 Ma après le début de la formation de la Terre.

Dotée d'une croûte continentale et d'océans, la Terre était donc *potentiellement habitable dès 4 400 Ma* (ce qui ne veut pas dire qu'elle ait été habitée).

Entre 4 100 et 3 900 millions d'années...

DERNIER BOMBARDEMENT MÉTÉORIQUE INTENSE : Une terre momentanément inhabitable ?

Au cours des 500 premiers millions d'années, la fréquence des collisions entre planétésimaux chute fortement.

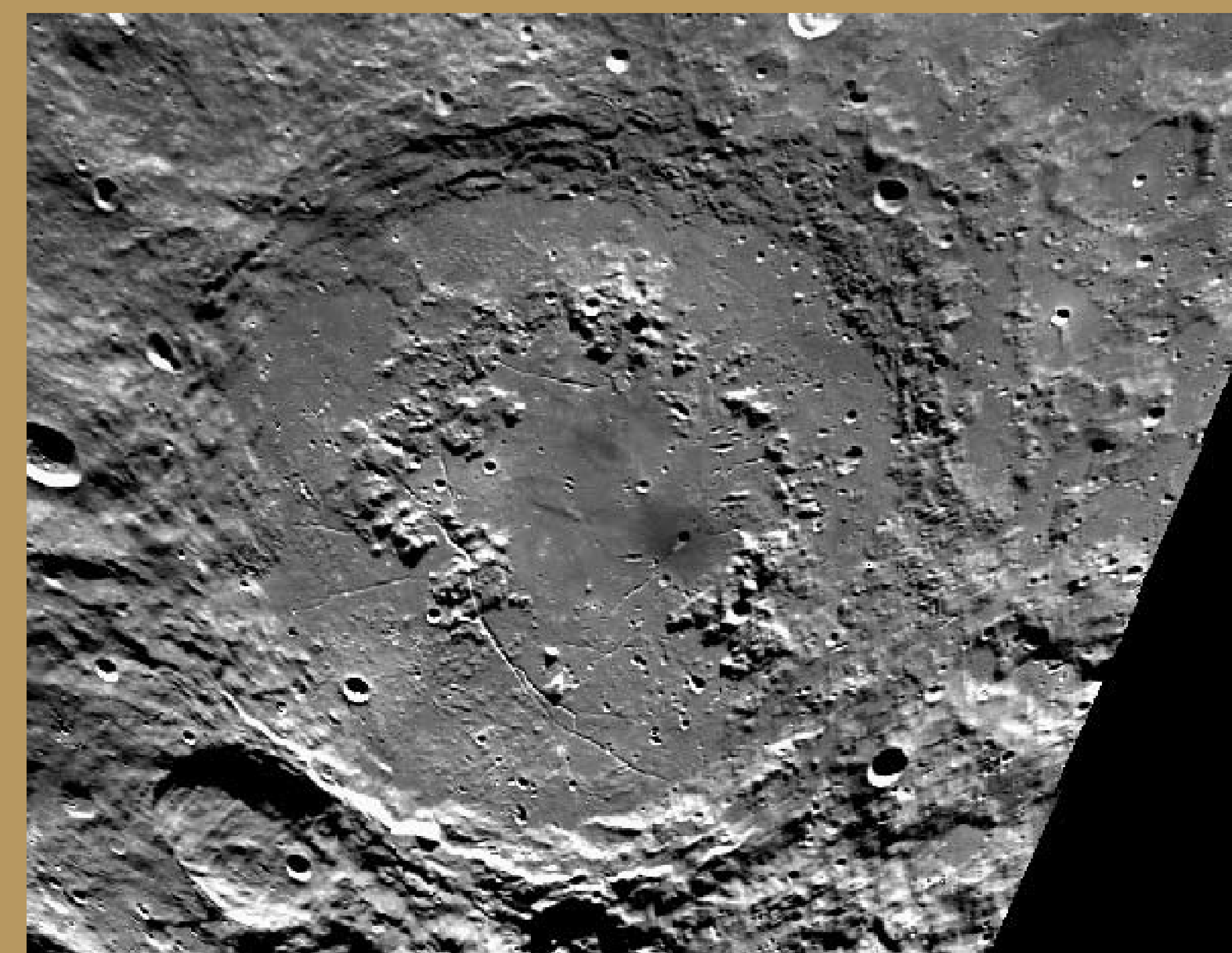
Toutefois les 1700 cratères lunaires datés autour de 3 900 Ma témoignent d'un épisode de *bombardement météorique* aussi unique qu'intense attribué à la réorganisation tardive des orbites des planètes gazeuses.

Par extrapolation, sur Terre, plus de 22 000 cratères se créent à cette époque, dont 200 avec un diamètre supérieur à 1000 km.

Si la vie existait déjà, soit

-elle disparut totalement et tout le processus dut recommencer à zéro, sans doute sous une forme différente,

- il y eut extinction en masse, mais les microorganismes habitant les grands fonds océaniques ou la subsurface rocheuse furent protégés et purent peut-être ensuite repeupler la planète.



"Schroedinger crater" formé pendant le bombardement intense à 3900 Ma. Son diamètre atteint 320 km mais il est loin d'être parmi les plus larges cratères lunaires. (image NASA)

Autour de 4 000 millions d'années...

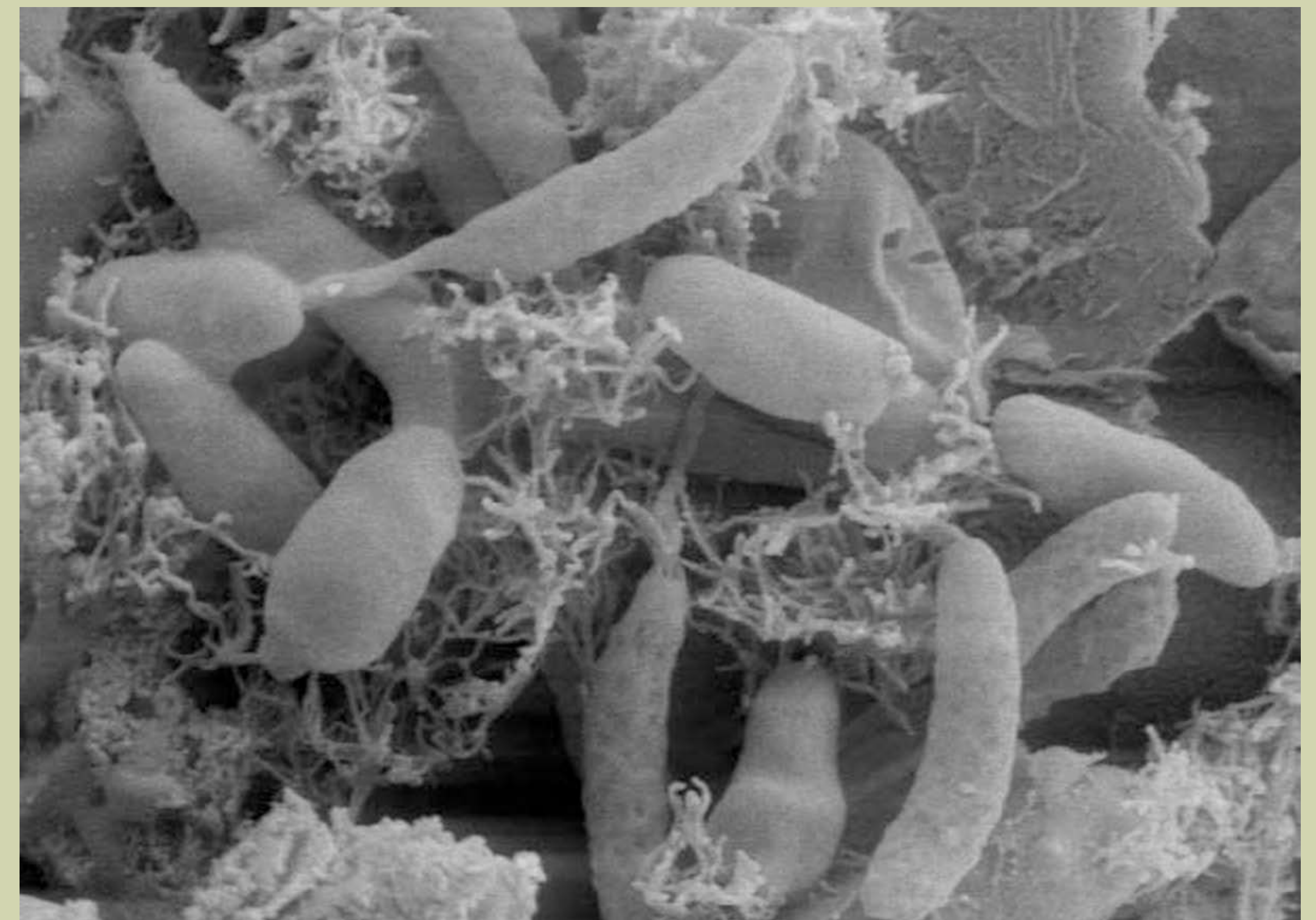
PASSAGE DU NON-VIVANT AU VIVANT:

De la chimie prébiotique aux premières cellules

La vie apparaît sur Terre à une date incertaine entre 4 300 Ma et 2 900 Ma et, *plus vraisemblablement, entre 3 800 Ma* (après le dernier grand bombardement météorique), et 3500 Ma (âge de microstructures minérales qui pourraient être les microfossiles les plus anciens connus).

Sous l'effet d'une activation (rayonnement solaire, éclairs), des molécules organiques peuvent se former soit dans *l'atmosphère* (constituée principalement d'azote N_2 , de dioxyde de carbone CO_2 , d'eau H_2O), soit dans les systèmes hydrothermaux *au fond des océans* en présence de minéraux réducteurs. Ces molécules organiques peuvent aussi être apportées par la chute de météorites particulières appelées chondrites carbonées.

Des réseaux de réactions chimiques se développent, des produits deviennent de plus en plus complexes et s'associent en systèmes supramoléculaires qui, à la suite d'étapes non totalement élucidées, donnent naissance aux premières cellules capables de se reproduire par division.



Les organismes vivants ont sans doute assez rapidement pris la forme des cellules les plus simples que nous connaissons aujourd'hui.

Autour de 3 500 millions d'années...

L'ÉVOLUTION BIOLOGIQUE DES ESPÈCES EST EN MARCHÉ : Les premières traces de vie probables

Les premières cellules commencent à se diversifier et à s'adapter à des niches écologiques variées. Ces cellules donnent naissance à un groupe d'organismes microscopiques de structure simple qu'on appelle *procaryotes*, et qui se sépare ensuite en 2 groupes : *les bactéries et les archées*. Ces procaryotes forment, entre autres, des communautés laminaires complexes qui provoquent la précipitation de minéraux (*stromatolites*).



Stromatolites fossiles vieux de 2700 Ma, Tumbiana, Pilbara, Australie. Ces structures ont été formées par la précipitation des carbonates au sein des communautés microbiennes complexes dont les producteurs primaires étaient des bactéries photosynthétiques, notamment des cyanobactéries. Celles-ci se disposent et migrent toujours à la surface pour avoir accès à la lumière, ce qui explique la structure en couches parallèles.

Des bactéries photosynthétiques utilisent l'énergie lumineuse pour fabriquer de la matière organique à partir du gaz carbonique (CO_2) et d'un donneur d'électrons (H_2S , Fe_2^+ ou même peut-être déjà H_2O).

Les *stromatolites fossiles* supposés les plus anciens datent d'il y a 3 450 Ma, mais certains scientifiques émettent un doute sur leur nature biogénique. Pour eux, les plus anciens stromatolites d'origine biologique seraient âgés de 2 700 Ma. Cette incertitude concerne aussi la datation d'autres traces fossiles.

Autour de 2 400 millions d'années...

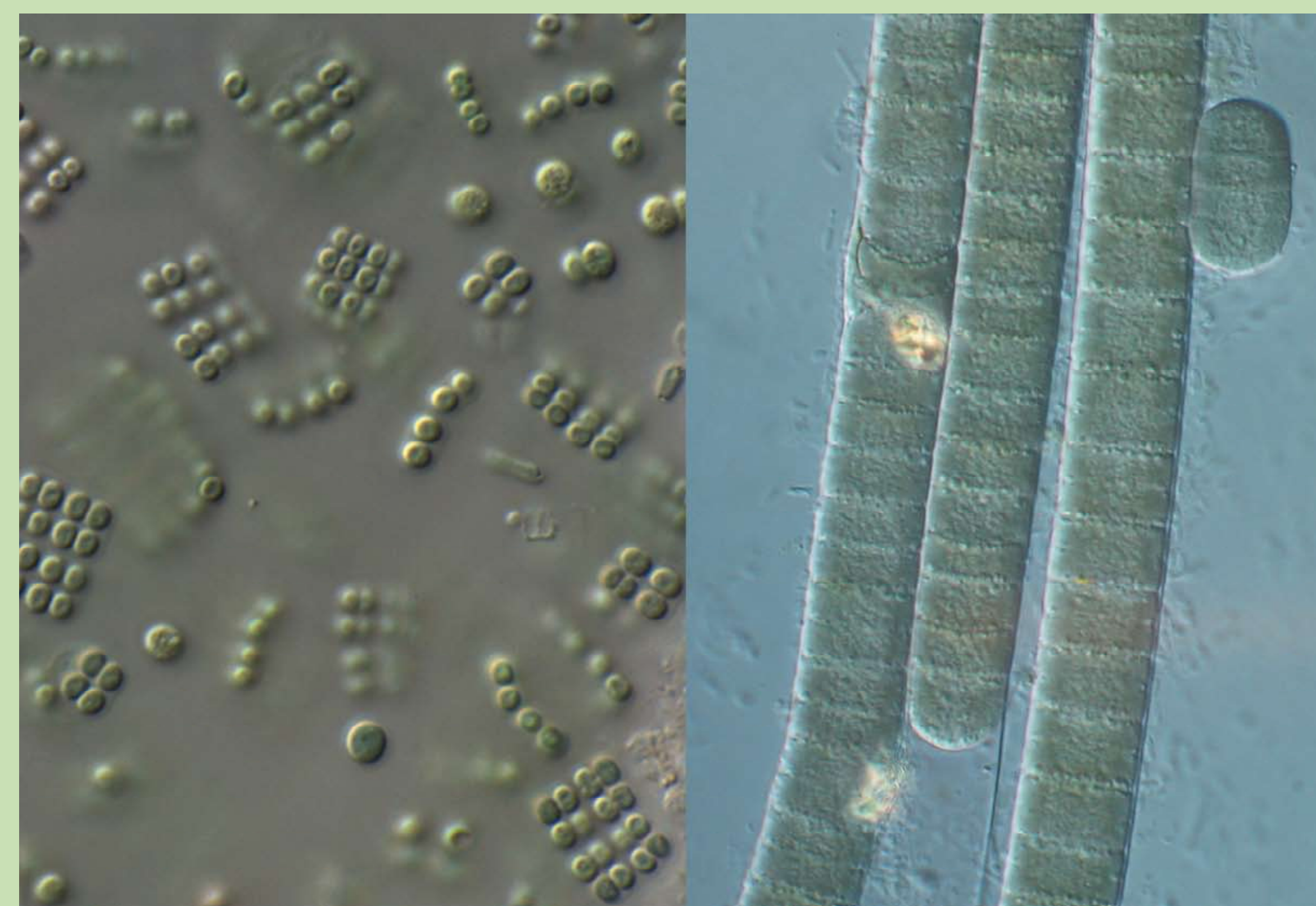
L'OCÉAN ET L'ATMOSPHERE COMMENCENT À ACCUMULER DE L'OXYGÈNE : Le rôle de la vie et de la sédimentation

L'oxygénation est la conséquence de la présence de vie sur notre planète et plus particulièrement de la présence des *cyanobactéries*.

Ce groupe d'organismes a en effet inventé la *photosynthèse oxygénique* qui libère l'oxygène comme produit secondaire. Or, la matière organique et l'oxygène produits par cette photosynthèse oxygénique ne sont pas entièrement consommés par la respiration des êtres vivants.

Avec le temps, la matière organique s'est accumulée dans les sédiments. Parallèlement l'excès d'oxygène s'est accumulé dans l'atmosphère et dans les sédiments et a oxydé les minéraux des roches à la surface de la planète (formation d'oxydes de fer dans les sédiments).

Une teneur maximum en oxygène a été atteinte il y a 350 millions d'années (Carbonifère). Depuis, il est probable que la respiration des organismes vivants équilibre la photosynthèse et que l'oxygène ne s'accumule plus.

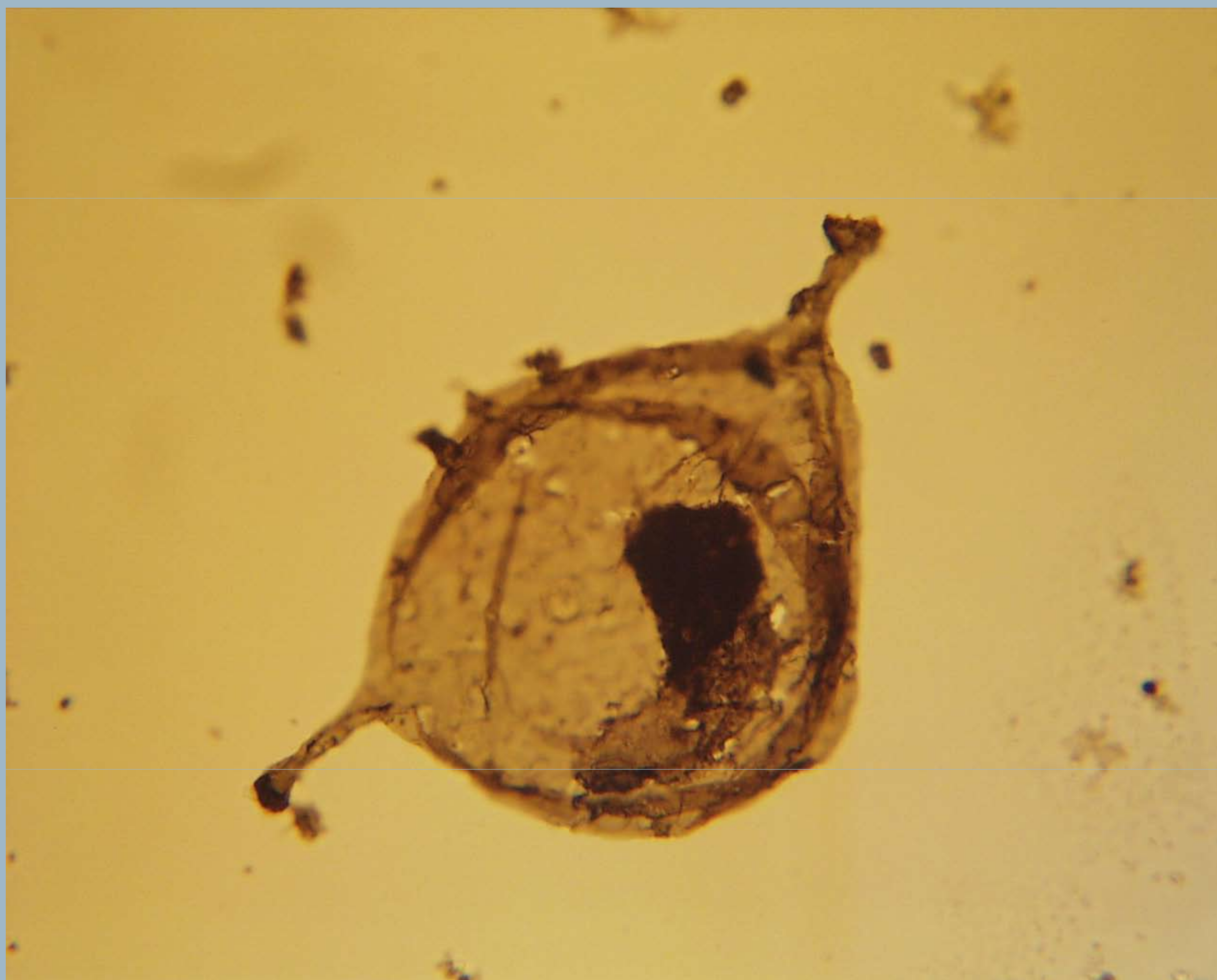


Différents types de cyanobactéries (coccoïdes à gauche, filamenteuses à droite). Ces bactéries produisent de l'oxygène lors de la photosynthèse.

Autour de 2 000 millions d'années...

L'APPARITION DES EUKARYOTES :

Les premières cellules à noyau et leurs traces fossiles



Tappiana plana, un microfossile eucaryote (cellule à noyau) de 1,5 Ga, groupe Roper, Australie. (photo E. Javaux)

Les *eucaryotes* sont des organismes qui, comme nous, possèdent des cellules comprenant un noyau (qui contient le matériel génétique) et des organites : *mitochondries*, où se fait la respiration de l'oxygène, et, dans le cas des plantes et des algues, *chloroplastes*, où se fait la photosynthèse. Les *mitochondries* et les *chloroplastes* dérivent d'anciennes bactéries incorporées par une cellule eucaryote. La cellule eucaryote est donc issue en grande partie de la *symbiose* entre organismes procaryotes plus simples.

Les premiers eucaryotes sont unicellulaires et n'ont pas de squelette minéral mais une paroi organique. Cependant, on peut les distinguer des procaryotes dans le registre fossile grâce à leur taille généralement (mais pas toujours) plus grande et surtout grâce à la structure ornementée de leur paroi. Les microfossiles eucaryotes les plus anciens datent d'il y a environ 1 800 Ma.

Entre 1 200 et 750 millions d'années...

APPARITION DES PREMIERS ORGANISMES MULTICELLULAIRES : *Des algues aux animaux en passant par les champignons et les plantes*

Les **premiers fossiles multicellulaires eucaryotes** retrouvés dans le registre fossile datent de 1 200 Ma. Il s'agit d'organismes ressemblant à des algues rouges vivant dans l'eau peu profonde.

Entre 1 000 et 750 Ma, d'autres microfossiles multicellulaires apparaissent : certaines algues, peut-être aussi des champignons et d'autres organismes non identifiés.

Des structures multicellulaires différenciées et spécialisées dans la réalisation d'une fonction précise apparaissent dans deux groupes d'eucaryotes : **les plantes et les animaux**.

Les fossiles animaux les plus anciens datent d'il y a environ 550-600 Ma. On voit d'abord apparaître des formes microscopiques fossiles, puis aussi des formes macroscopiques mais sans squelette ni coquille.

La biominéralisation animale (aptitude des animaux à précipiter des minéraux) apparaît juste avant le Cambrien. Les plantes apparaissent plus tard, comme en témoignent les spores fossiles de mousses il y a environ 440 Ma.



Bangiomorpha pubescens, une algue rouge multicellulaire d'environ 1,2 Ga, Somerset island, Spitsbergen. (photo Nick Butterfield)

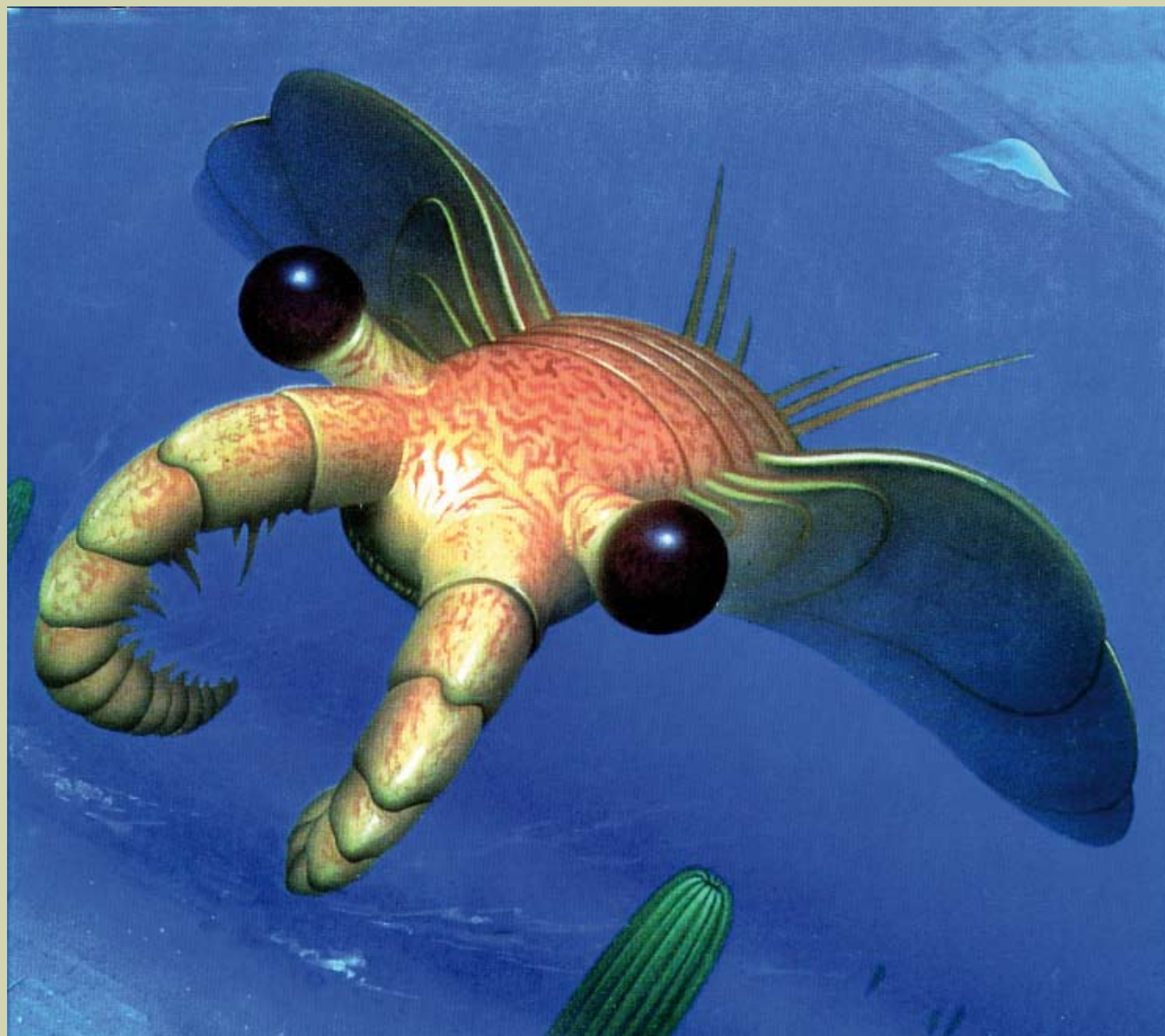
540 millions d'années...

L'EXPLOSION CAMBRIENNE :

La vie animale se diversifie et développe coquilles et carapaces

Les premiers animaux ayant laissé des traces dans le registre fossile juste avant le Cambrien étaient des organismes à corps mous montrant une énorme richesse de plans d'organisation corporelle (la fameuse "*faune d'Ediacara*"). La plupart de ces formes disparaissent ensuite mystérieusement. Des animaux à squelette calcaire apparaissent aussi juste avant le Cambrien.

Au Cambrien, on voit apparaître à nouveau une grande diversité d'animaux fossiles mais, cette fois, avec une richesse de plans d'organisation moindre qui s'accompagne souvent de coquilles, de carapaces, d'épines et de divers appendices. Ces éléments ont vraisemblablement un rôle protecteur face à la prédation croissante, d'autres sont utiles pour capturer des proies.



Anomalocaris, un prédateur nageant dans l'océan il y a 505 Ma (45 cm de long).

Cette diversification rapide dans un laps de temps relativement court constitue ce qu'on appelle *une radiation évolutive*. Elle est due à l'apparition des innovations biologiques (structures de protection et prédation, nouveaux modes de vie) qui permettent la conquête des nouvelles niches écologiques, dans une atmosphère de plus en plus riche en oxygène.

En parallèle, la vie planctonique microscopique continue à se diversifier et à évoluer.

Entre 450 et 400 millions d'années...

VIVRE HORS DE L'EAU :

Des "pattes aquatiques" aux "pattes terrestres"

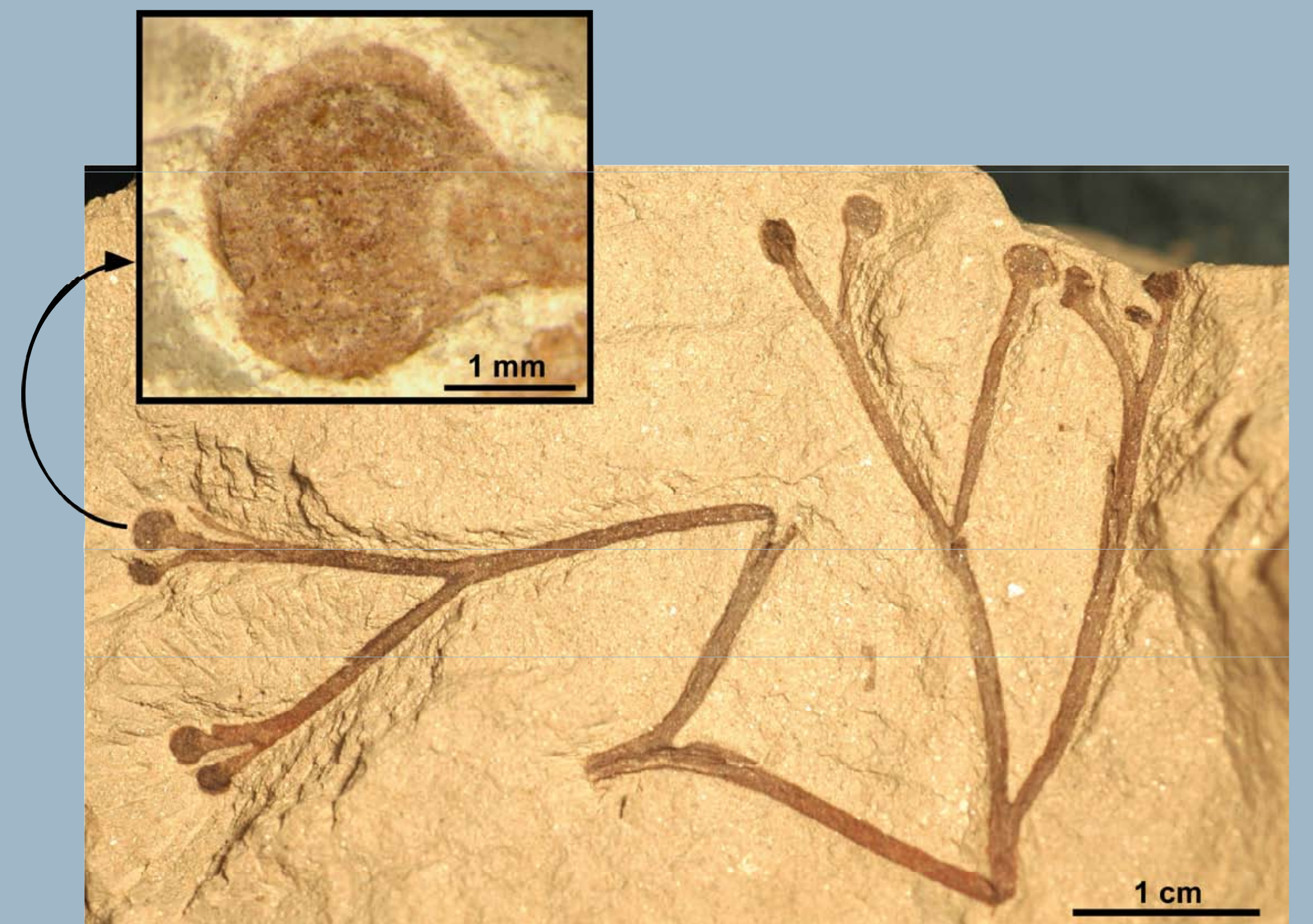
Bien que des tapis microbiens existent déjà à l'Archéen (entre 4 et 2,5 milliards d'années), les premières plantes apparentées aux mousses n'apparaissent que vers 450 Ma.

Les animaux eux sortent de l'eau vers 350 Ma. L'apparition des pattes n'a rien à voir avec cette sortie des eaux : les premiers tétrapodes étaient en effet aquatiques ! Ces membres apparus il y a plus de 375 Ma, ne pouvaient pas soutenir ou déplacer un corps hors de l'eau mais permettaient de s'agripper aux végétaux et rochers. Plus tard, ces "pattes" aquatiques évolueront et permettront la marche sur le sol.

Les poumons apparaissent également chez un groupe de poissons. Les *amphibiens* sortent de l'eau grâce à une série d'autres nouveautés comme la circulation sanguine pulmonaire et des glandes pour lutter contre la dessiccation. Ils pondent dans l'eau et peuplent lacs et marécages.

Des forêts luxuriantes apparaissent vers 350 Ma et sont peuplées d'insectes et arachnides géants.

Les écosystèmes continentaux complexes se développent.



Cooksonia caledonica, une des premières plantes vasculaires (qui a des cellules conductrices de sève), 415 Ma, Brésil (photo Philippe Gerrienne)

Entre 450 et 65 millions d'années...

LES CINQ GRANDES CRISES ET EXTINCTIONS : D'une glaciation intense à la chute d'une énorme météorite, en passant par les éruptions volcaniques

Cinq grandes crises marquent l'histoire de la vie et entraînent la disparition brutale de nombreux organismes mais aussi la radiation de nouvelles espèces.

La plus ancienne de ces extinctions en masse, vers 450 millions d'années, est probablement causée par une brutale glaciation.

Des éruptions volcaniques massives sont invoquées pour expliquer la plus importante extinction (environ 90% des espèces) vers 250 millions d'années.

La chute d'une énorme météorite (10 km) au Yucatan (Mexique), formant un cratère d'environ 200 km de diamètre entraîne des changements climatiques majeurs, il y a 65 millions d'années. Environ 60% de la faune et de la flore terrestre disparaît, y compris les dinosaures, cédant ainsi la place aux mammifères.

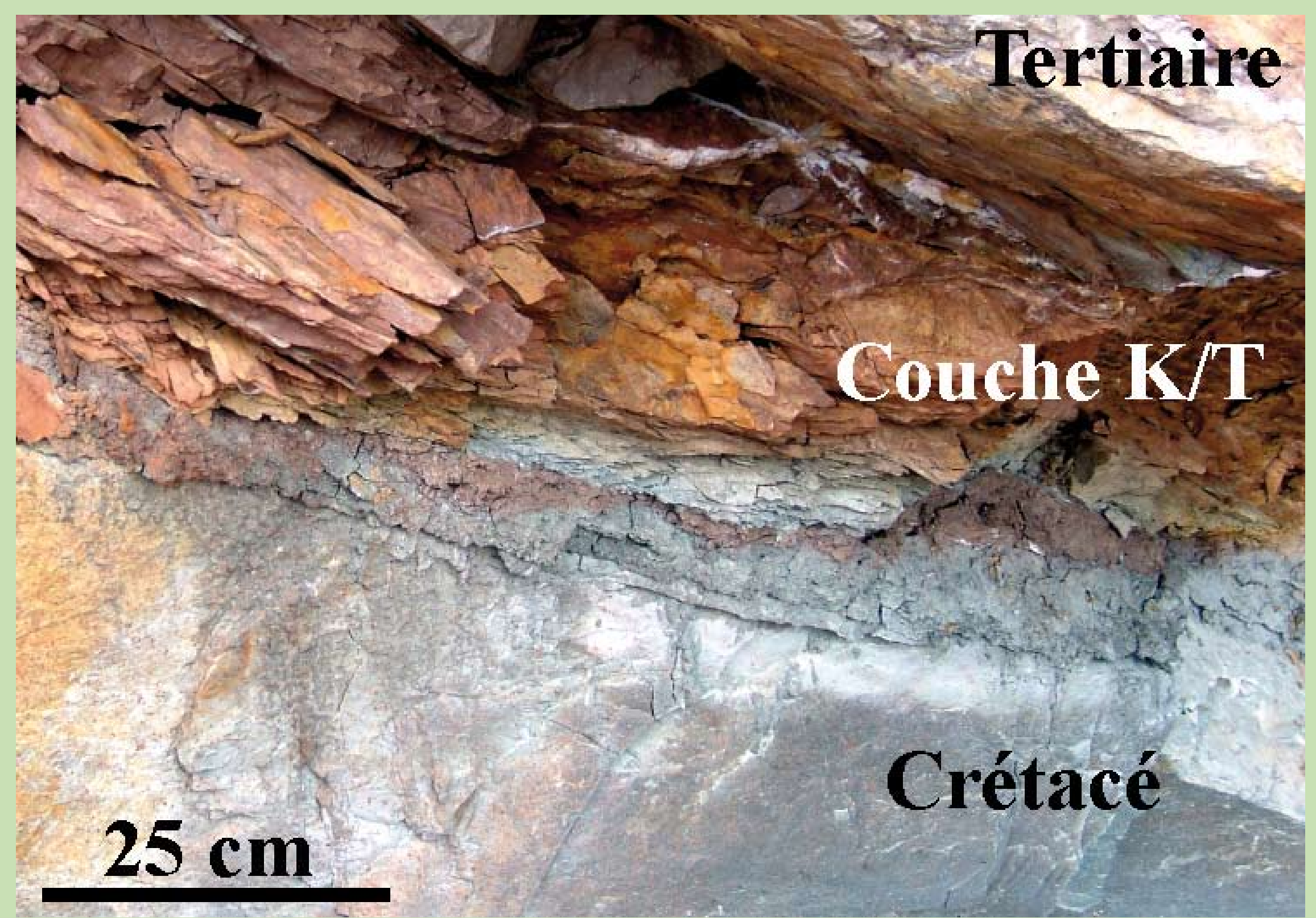


Photo de la limite Crétacé - Tertiaire (couche KT) dans les falaises de la baie de Loya à Hendaye. Contrairement aux deux couches qui l'entourent, cette couche feuilletée de 10 cm d'épaisseur de couleur rouge ocre, est extrêmement riche en iridium. Cet élément de la famille du platine est d'origine extraterrestre. Il a été apporté par la chute de la météorite de Chicxulub dans la presqu'île du Yucatan. Cet impact a provoqué un cataclysme planétaire à l'origine des grandes extinctions (dinosaures, ammonites, etc) observées au passage Crétacé - Tertiaire.

0,2 millions d'années...

L'APPARITION DE L'HOMME :

L'homme et sa place dans la diversité du vivant

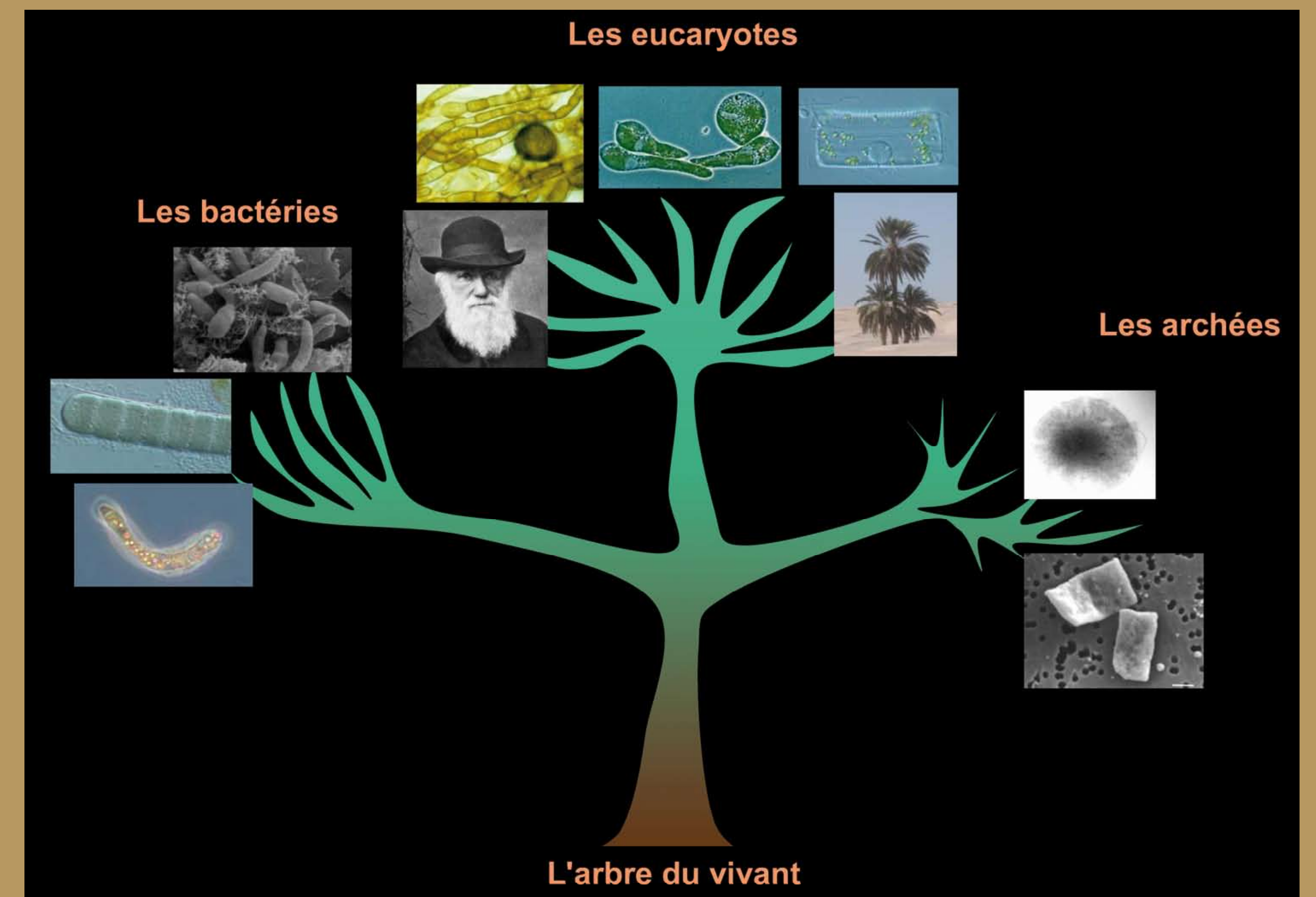
L'espèce humaine, *Homo sapiens*, occupe une branche parmi les milliers de branches de l'arbre du vivant. Elle a évolué il y a environ 200 000 ans au sein d'une lignée faisant partie des *primates* qui comprenait d'autres espèces d'hominidés -aujourd'hui fossiles-. L'espèce actuelle la plus proche des hominidés est le chimpanzé. Les *primates* sont des mammifères. Ils constituent une classe d'organismes au sein des vertébrés, qui à leur tour font partie des animaux.

Les *animaux*, avec leurs cousins les champignons, appartiennent à un grand groupe d'organismes au sein des eucaryotes. Les plantes, elles, font partie d'un autre grand groupe distant de celui-là.

Les *eucaryotes* constituent une des trois branches de l'arbre (plutôt buisson) du vivant, les deux autres groupes *bactéries* et *archées* étant des procaryotes.

Bactéries, archées et eucaryotes dérivent, dans la généalogie du vivant d'un *même ancêtre commun*.

Parallèlement à l'évolution de l'homme, une extraordinaire diversité d'espèces animales, végétales, et de microorganismes a également évolué et continue aujourd'hui de le faire.



L'homme dans l'arbre du vivant. L'homme occupe l'extrémité d'une branche parmi les très nombreuses branches qui peuplent la lignée des eucaryotes, l'un des trois domaines du vivant. Les organismes des trois domaines du vivant descendent tous d'un seul ancêtre commun.