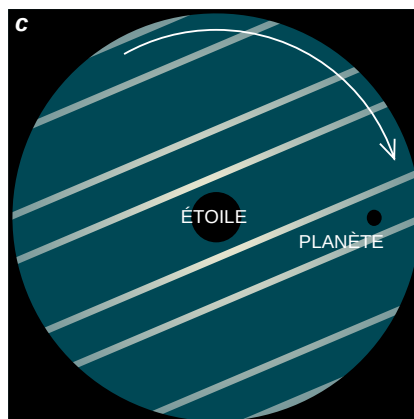
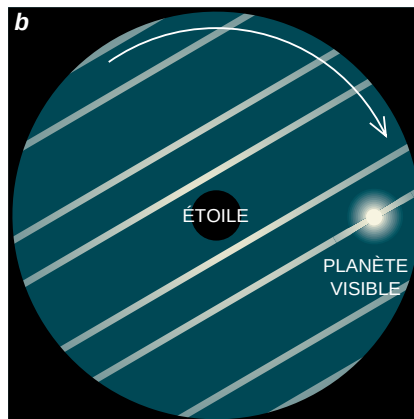
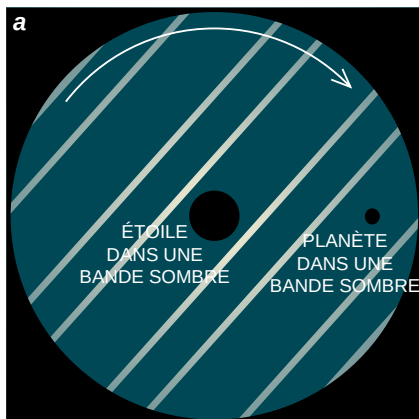
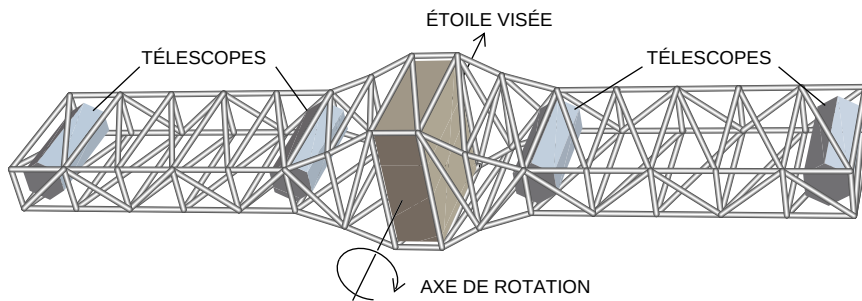




5. UN INTERFÉROMÈTRE ROTATIF pourrait révéler l'existence d'une planète autour d'une étoile lointaine. Les quatre télescopes produiraient une vue du ciel partiellement obscurcie par de nombreuses bandes ; l'étoile à masquer serait dissimulée par une bande. Lors d'une rotation de l'interféromètre autour d'un axe joignant le centre du dispositif à l'étoile, les bandes sombres tourneraient également. Une planète voisine serait alternativement masquée, puis découverte (a-c). L'analyse des clignotements permettrait de déterminer la distance séparant la planète de son étoile.

de sorte que le télescope serait naturellement refroidi et que la lumière zodiacale serait minimisée. En raison de la diminution de la lumière de fond, l'interféromètre orbital pourrait être réduit : quatre télescopes de un mètre de diamètre chacun constitueraient un instrument sensible, avec toutefois un inconvénient : il éliminerait si efficacement la lumière stellaire qu'il masquerait parfois une planète proche.

Cette idée a fait l'objet, sous le nom de *Mission Darwin*, d'une proposition de l'Agence spatiale européenne. Elle a été retenue comme l'une des trois pierres angulaires possibles de l'Agence pour les années 2015. En attendant, le CNES décidera peut-être d'un projet plus modeste, nommé *Corot*, pouvant également détecter, par occultation, des planètes de la taille de la Terre sur des orbites analogues à celle de Mercure, ou plus serrées encore.

Enfin, le 7 mai 1996, le CNRS a créé une action spécifique «Planètes extrasolaires».

Puis, en 1995, la NASA lança un appel d'offres pour l'exploration d'autres systèmes planétaires et sélectionna finalement trois équipes afin de comparer différentes techniques de détection. Nous avons constitué une équipe avec R. Bracewell, A. Léger, Jean-Marie Mariotti et une vingtaine d'autres scientifiques et ingénieurs. Nous avons notamment conçu un interféromètre comportant deux paires de miroirs disposés en ligne droite. Chaque paire de miroirs obscurcira l'image principale de l'étoile, et chaque paire éliminera en outre la lumière parasite de l'autre paire.

Cet interféromètre pourrait atteindre 50 à 75 mètres de longueur.

Avec une telle configuration, les signaux de planètes sont complexes et caractéristiques, et une méthode d'analyse appropriée permettra d'utiliser les données de l'interféromètre pour reconstruire l'image d'un système solaire lointain (voir la figure 4). Cet interféromètre orbital pourrait observer chaque jour une étoile différente, revenant parfois à des systèmes intéressants pour des observations plus approfondies.

S'il était pointé sur notre Système solaire à partir d'une étoile voisine, l'interféromètre repèrerait Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, et l'analyse des données révélerait la composition chimique de l'atmosphère de chaque planète. De notre Système solaire, le dispositif pourrait facilement étudier la planète récemment découverte autour de l'étoile 47 Ursae Majoris. De surcroît, il pourra identifier des planètes de type terrestre qui, autrement, nous échapperaient, et rechercher la présence de dioxyde de carbone, d'eau et d'ozone sur toutes ces planètes.

Un tel instrument pourrait être construit en collaboration avec des astronomes de plusieurs pays. Nous estimons le coût de ce projet à moins de deux milliards de dollars, soit dix pour cent du budget de la NASA consacré à la recherche spatiale pour les dix prochaines années. La découverte de la vie sur une autre planète serait le couronnement de l'exploration spatiale.

La technique nécessaire à cette découverte est à notre portée. Après des siècles d'interrogations, nous devrions bientôt être à même de savoir si nous sommes les seuls êtres vivants dans l'Univers.

Roger ANGEL et Neville WOOLF sont astronomes à l'Université de l'Arizona.

J. Roger P. ANGEL, *Use of a 16 Meter Telescope to Detect Earthlike Planets*, in *The Next Generation Space Telescope*, sous la direction de P. Bely et C.J. Borrows, Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1990.

La vie dans l'Univers, numéro spécial de *Pour la Science*, décembre 1994.

A. LÉGER, M. MARIOTTI, J.-C. PUGET, D. ROUAN et J. SCHNEIDER, *How Detect Signs of Primitive Life on Exoplanets*, *The Darwin Mission*, in *Astrophysics and Space Science*, vol. 233, janvier 1995.

La naissance des cellules complexes

CHRISTIAN DE DUVE

L'homme, les animaux, les plantes et les champignons existent parce que de minuscules bactéries primitives se sont, un jour, transformées en cellules de grande taille dotées d'une remarquable organisation.

Les premiers organismes vivants sont apparus sur la Terre il y a environ 3,7 milliards d'années, sous la forme de petits microbes unicellulaires semblables à certaines bactéries modernes. De telles cellules sont dites procaryotes, parce qu'elles sont dépourvues de noyau (en grec, *karyon* signifie noyau), le compartiment qui contient la machinerie génétique. Grâce à leur remarquable faculté d'évolution et d'adaptation, les procaryotes se sont diversifiés en une multitude d'espèces et ont colonisé tous les habitats disponibles.

La Terre serait encore exclusivement peuplée de procaryotes si un phénomène évolutif extraordinaire n'avait fait apparaître une nouvelle variété de cellules, dites eucaryotes, dotées d'un vrai noyau (en grec, *eu* signifie bien). Les conséquences de cet événement furent d'une portée exceptionnelle. Aujourd'hui, tous les organismes pluricellulaires se composent de cellules eucaryotes, immensément plus complexes que les procaryotes. Sans l'apparition des cellules eucaryotes, l'exubérante variété de la vie végétale

et animale n'existerait pas, et l'homme ne serait pas là pour jouir de cette diversité et en percer les secrets.

Les cellules eucaryotes proviennent sans doute de cellules procaryotes ancestrales, mais on ignore comment s'est effectué le passage, car aucun intermédiaire de cette transition n'a survécu ni laissé de fossiles, témoins directs. On ne peut qu'observer le produit final eucaryote, totalement différent de n'importe quelle cellule procaryote. Toutefois, grâce aux nouveaux outils dont ils disposent, les biologistes ont découvert entre certains caractères des eucaryotes et des procaryotes des parentés qui éclairent leur filiation.

Pour apprécier cet étonnant périple évolutif, on doit considérer les principales différences qui distinguent les deux types cellulaires. Les cellules eucaryotes sont beaucoup plus grandes que les procaryotes (leur volume est environ 10 000 fois supérieur), et l'information génétique y est entreposée sous une forme beaucoup plus organisée. Chez les procaryotes, tout le message génétique est concen-

tré sur un unique chromosome, qui a la forme d'un anneau d'ADN, en contact direct avec les autres constituants cellulaires. Chez les eucaryotes, la majeure partie de l'ADN est contenue dans des chromosomes structurés et regroupés à l'intérieur d'un enclos central bien délimité, le noyau. La région qui entoure le noyau, ou cytoplasme, est cloisonnée par des membranes en un réseau élaboré de compartiments qui accomplissent une multitude de fonctions. Des éléments cytosquelettiques présents dans le cytoplasme assurent aux cellules eucaryotes un support structural interne et, à l'aide de minuscules moteurs moléculaires, leur permettent de brasser leur contenu et de se propulser d'un endroit à un autre.

Les cellules eucaryotes se distinguent encore des cellules procaryotes par la présence dans leur cytoplasme d'un grand nombre – parfois des milliers – de structures spécialisées, ou organites, dont la taille est approximative-

1. LES CELLULES PROCARYOTES ET EUCARYOTES diffèrent par la taille et par leur complexité. Les cellules procaryotes (ci-contre) ont un diamètre de un micromètre environ, tandis que celui des cellules eucaryotes est compris le plus souvent entre 10 et 30 micromètres. Une cellule eucaryote, représentée ici par une algue verte hypothétique (à l'extrême droite), renferme une grande variété de structures spécialisées, dont un noyau entouré d'une enveloppe qui contient l'essentiel du patrimoine génétique de la cellule.



CELLULES PROCARYOTES

ment celle d'une cellule procaryote. Les plus importants de ces organites sont les peroxyosomes (qui remplissent diverses fonctions métaboliques), les mitochondries (les centrales qui alimentent les cellules en énergie) et, chez les plantes et les algues, les plastides (les sites de la photosynthèse). En réalité, avec leurs multiples organites et leurs structures internes compliquées, même les eucaryotes unicellulaires, telles les levures ou les amibes, sont déjà des organismes très complexes.

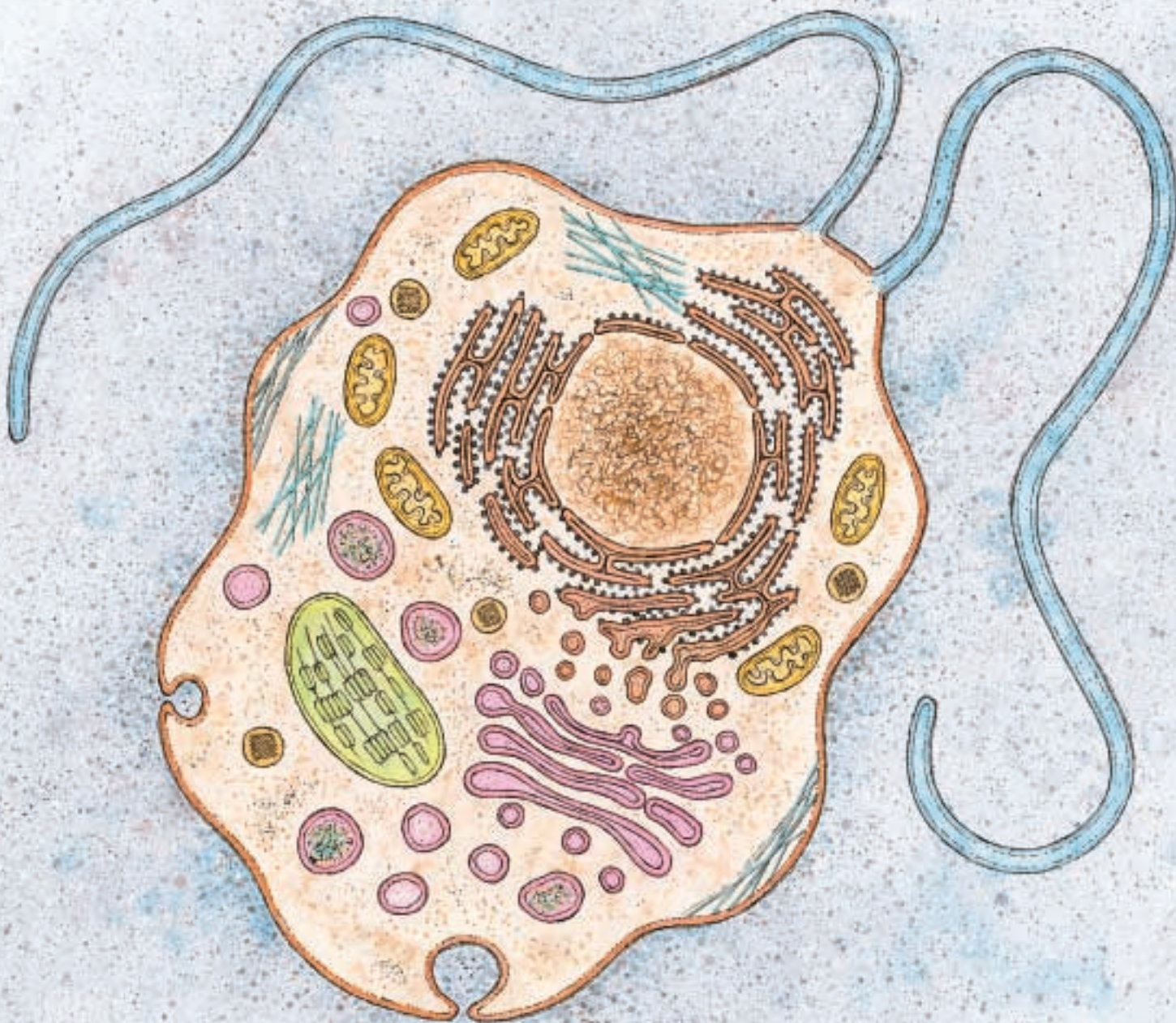
L'organisation des cellules procaryotes est beaucoup plus rudimentaire. Néanmoins, les deux types cellulaires sont indéniablement apparentés. C'est ce que démontrent leurs nombreuses similitudes génétiques. Celles-ci ont même permis de dater approximativement le moment où la branche eucaryote de l'arbre phylogénique s'est séparée du tronc procaryote. Cette divergence a probablement commencé il y a plus de trois milliards d'années. Les évé-

nements qui se sont produits ensuite, sur un milliard d'années ou plus, ont conduit aux eucaryotes ; ils seraient restés enveloppés de mystère si l'étude des nombreux organites contenus dans le cytoplasme n'avait apporté un indice révélateur.

Un repas fatidique

Les biologistes soupçonnent depuis longtemps que les mitochondries et les plastides proviennent de bactéries

CELLULE EUCARYOTE



Premières étapes de l'évolution vers une cellule eucaryote

PAROI CELLULAIRE

BOUCLE D'ADN

La transformation d'une cellule procaryote en une cellule eucaryote a peut-être commencé par les étapes schématisées sur ces deux pages.

MEMBRANE NUE

CIRCONVOLUTION

VÉSICULE INTRACELLULAIRE

LA PERTE DE LA PAROI CELLULAIRE a probablement été le premier événement. La cellule n'était plus délimitée que par une membrane souple où étaient fixés de nombreux ribosomes (*les points noirs*), sièges de la synthèse protéique, servant ici à l'assemblage des enzymes digestives qui sont déversées à l'extérieur.

L'APPARITION DE CIRCONVOLUTIONS dans la membrane cellulaire permet à la cellule de grossir, car les plis augmentaient la surface d'absorption des éléments nutritifs prélevés dans l'environnement (*en vert*). À ce stade, les enzymes digestives accomplissent leur travail de morcellement uniquement à l'extérieur de la cellule.

qu'une cellule hôte ancestrale aurait adoptées comme endosymbiontes (ce mot dérivé du grec signifie qui vivent ensemble, l'un dans l'autre). Émise il y a plus de 100 ans, cette hypothèse ne rencontra que peu de succès avant d'être ressuscitée, en 1967, par Lynn Margulis, alors à l'Université de Boston, qui l'a depuis défendue sans relâche contre ce qui fut d'abord une forte opposition. Aujourd'hui, sa force de persuasion n'est plus nécessaire, car on a des preuves irréfutables de l'origine bactérienne des mitochondries et des plastides.

La présence, à l'intérieur de ces organites, d'un vestige encore fonctionnel de système génétique est l'indice le plus convaincant. Ce système contient des gènes composés d'ADN, la machinerie de réplication de cet ADN, et tous les outils moléculaires nécessaires à l'élaboration de protéines à partir de modèles codés par l'ADN. Diverses propriétés caractérisent cet appareil génétique comme étant de nature procaryotique et le différencient de la machinerie génétique eucaryotique.

On présente souvent l'endosymbiose comme le résultat d'une ren-

contre aléatoire – prédation agressive, invasion pacifique, association mutuellement bénéfique ou fusion – entre deux procaryotes typiques. Toutefois, cette interprétation n'est pas satisfaisante, car les bactéries modernes ne présentent pas ces comportements. De plus, l'hypothèse d'une simple union entre deux procaryotes laisse inexplicables de nombreuses caractéristiques des cellules eucaryotes. Il existe une autre explication, beaucoup plus simple et suggérée par la nature elle-même, notamment que les endosymbiontes furent originellement ingurgités par une cellule hôte de grande taille ayant déjà acquis diverses propriétés caractéristiques des cellules eucaryotes.

De nombreuses cellules eucaryotes modernes – les leucocytes, par exemple – capturent des procaryotes. Normalement, les micro-organismes ingérés sont tués et dégradés. Parfois, ils échappent à cette destruction et se retournent contre leurs ravisseurs, lésant ou tuant ceux-ci. Exceptionnellement, ravisseur et victime survivent dans un état de tolérance réciproque, qui peut se muer en assis-

LE REPLIEMENT de la membrane vers l'intérieur lui a permis de fusionner par endroits ; les vésicules qui se sont ainsi détachées ont formé des compartiments internes isolés. Dès lors, la digestion pouvait s'effectuer à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur de la cellule. L'intériorisation du fragment de membrane où était fixé l'ADN a créé un sac porteur d'ADN, précurseur du noyau cellulaire.

tance, puis en dépendance mutuelle. C'est ainsi que les mitochondries et les plastides auraient pu devenir les invités permanents des cellules hôtes.

Si cette hypothèse est exacte, elle explique plusieurs aspects de l'évolution primitive de l'hôte. Quelque ancêtre procaryote des eucaryotes a d'abord dû évoluer en phagocyte primitif (ou cellule mangeuse), capable d'engloutir de gros objets tels que des bactéries. Si cette cellule ancienne ressemblait quelque peu aux phago-

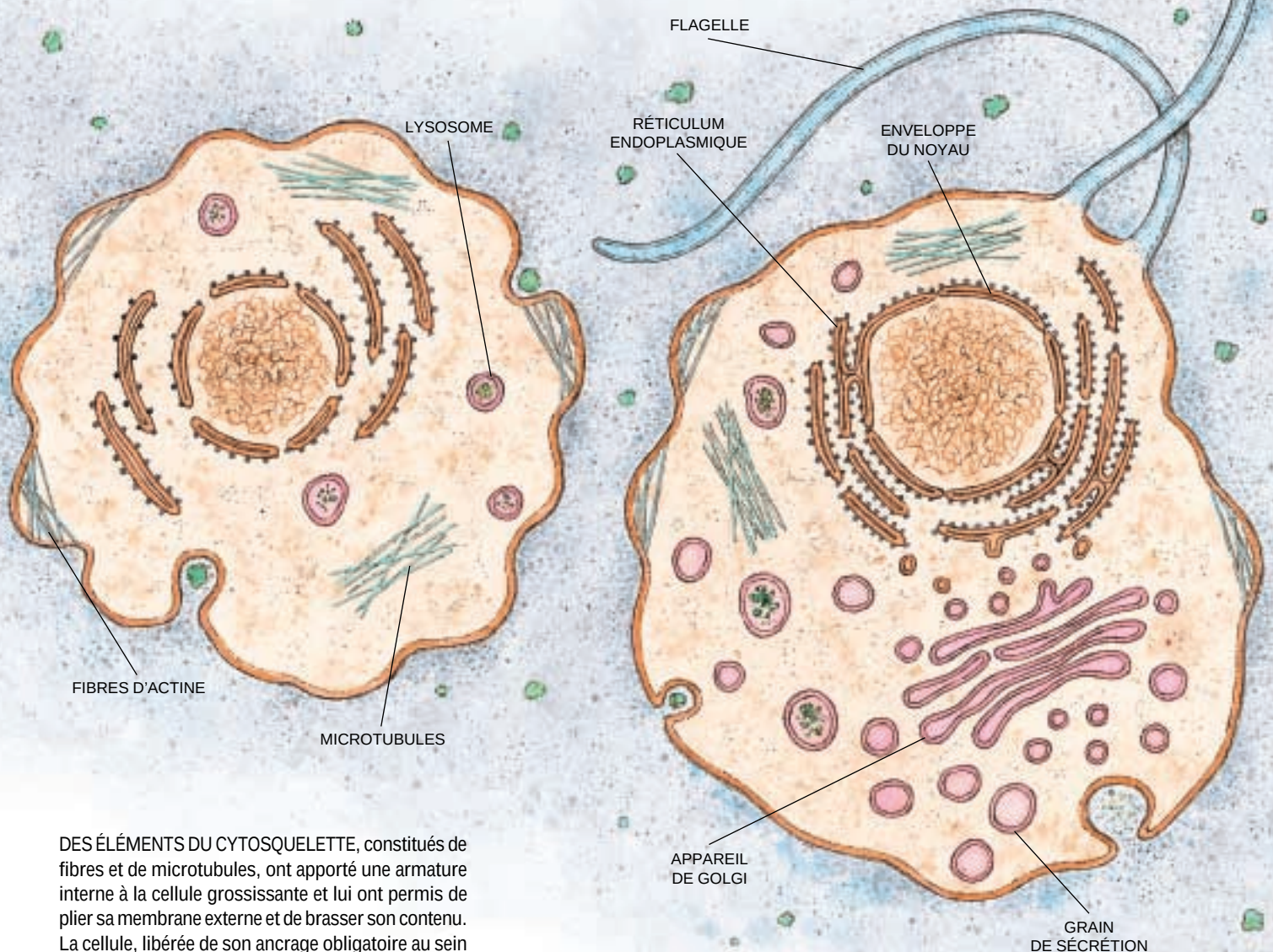
cytes modernes, elle devait être beaucoup plus grande que ses proies et entourée d'une membrane externe suffisamment souple pour envelopper des objets extracellulaires volumineux. Ce phagocyte primitif était vraisemblablement doté d'un réseau interne de compartiments reliés à la membrane externe et spécialisés dans le traitement des matériaux ingérés. Un squelette interne lui assurait sans doute un soutien structural et il possédait probablement une machinerie moléculaire lui permettant de replier sa membrane externe et de brasser ses

constituants internes. L'apparition de telles structures cellulaires constitue l'essentiel de la transition procaryote-eucaryote.

Dès lors, le principal problème qui se pose est d'expliquer d'une manière plausible l'élaboration progressive de ces caractéristiques par le jeu de la sélection naturelle : chaque petite modification a dû améliorer les chances de survie et de reproduction de la cellule, lui conférant ainsi un avantage sélectif, de telle sorte que le trait modifié se répandait de plus en plus largement dans la population.

Genèse d'une cellule mangeuse

Quelles sont les forces qui auraient pu pousser un procaryote primitif à évoluer vers une cellule eucaryote moderne? Pour répondre à cette question, je suppose tout d'abord que la cellule ancestrale se nourrissait de débris et de résidus provenant d'autres organismes, comportement que les biologistes qualifient d'hétérotrophe ; elle vivait donc dans un environnement qui lui procurait sa nourriture. Selon une hypothèse



DES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE, constitués de fibres et de microtubules, ont apporté une armature interne à la cellule grossissante et lui ont permis de plier sa membrane externe et de brasser son contenu. La cellule, libérée de son ancrage obligatoire au sein d'une source de nourriture, devint capable de happer, d'ingérer et de digérer de grandes particules. Elle finit par capturer tous ses aliments de cette façon, utilisant pour les digérer des enzymes déversées dans des sacs intracellulaires par un réseau de plus en plus étendu de compartiments internes. Certains de ces compartiments s'aplatirent et enveloppèrent l'amas croissant d'ADN.

UN PHAGOCYTE PRIMITIF, une «cellule mangeuse», finit par se développer de cette succession d'étapes évolutives. Pour se propulser, cette cellule utilisait des flagelles, des prolongements ressemblant à des fouets. Le phagocyte acquit également un vrai noyau (quand les compartiments qui entouraient l'ADN fusionnèrent), ainsi qu'un ensemble de structures cellulaires, de plus en plus élaborées, issues de fragments intériorisés de la membrane cellulaire.

séduisante, elle vivait dans le genre de colonies procaryotes dont la fossilisation a donné naissance à des roches stratifiées appelées stromatolithes. De telles colonies vivantes existent encore aujourd'hui : ce sont des couches d'organismes hétérotrophes surmontées par des organismes photosynthétiques qui se multiplient grâce à la lumière et fournissent leur nourriture aux couches inférieures. Les fossiles indiquent que de telles colonies existaient déjà il y a plus de 3,5 milliards d'années.

Ma deuxième hypothèse, corollaire de la précédente, stipule que l'organisme primitif digérait ses aliments. Je suppose qu'il le faisait, comme la plupart des procaryotes hétérotrophes modernes, à l'aide d'enzymes sécré-

tées qui dégradaient les aliments à l'extérieur de la cellule : la digestion précédait l'ingestion.

Enfin, troisième hypothèse, cet organisme aurait perdu la capacité de fabriquer une paroi cellulaire, enveloppe rigide qui entoure presque tous les procaryotes, en maintenant la structure et en assurant la protection. Nonobstant leur fragilité, des formes dénudées de ce genre existent naturellement aujourd'hui, parfois même dans des environnements défavorables. Dans le cas présent, la colonie de stromatolithes aurait offert un excellent abri à l'organisme ancestral.

Ces trois hypothèses admises, on imagine cet organisme comme un petit globule aplati et souple, hautement déformable et en contact étroit avec

sa source de nourriture. Une telle cellule devrait pouvoir se développer mieux et plus vite que ses parentes entourées par une paroi rigide, sans cependant répondre nécessairement à la croissance par la division, comme c'est le cas pour les autres cellules. Un autre comportement aurait pu être l'expansion et le plissement de la membrane externe, permettant ainsi une augmentation de la surface disponible pour l'ingestion des substances nutritives et pour l'élimination des déchets (facteurs qui limitent la croissance de toute cellule).

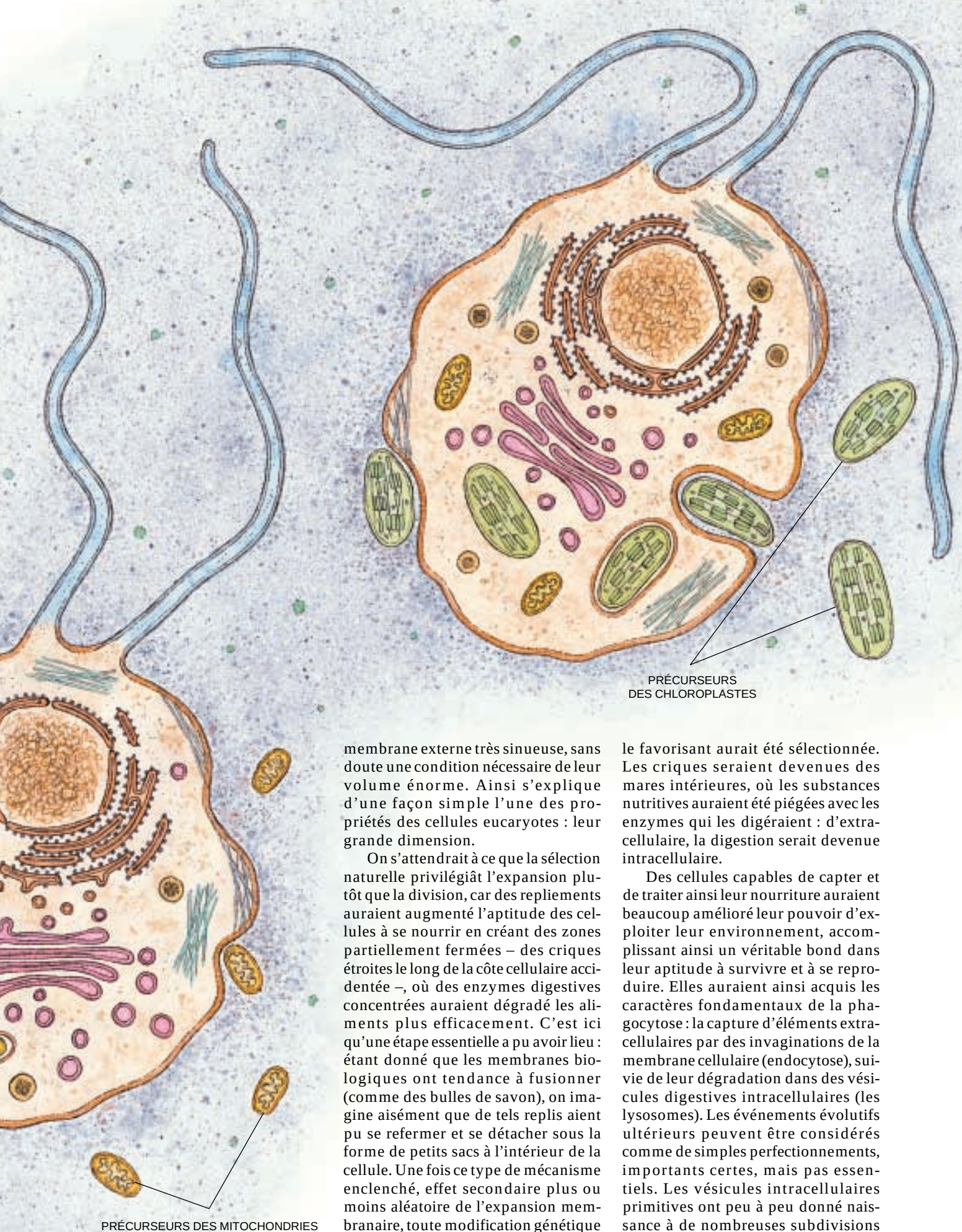
Grâce à sa surface plissée, cet organisme aurait pu atteindre une taille bien supérieure à celle des procaryotes ordinaires. Effectivement, certains procaryotes géants modernes ont une

Les dernières étapes de l'évolution d'une cellule eucaryote

L'adoption de procaryotes en tant qu'«invités permanents» de volumineux phagocytes a marqué la dernière phase de l'évolution des cellules eucaryotes. Les précurseurs des peroxysomes (*en beige*, à gauche) ont peut-être été les premiers procaryotes à évoluer en organites eucaryotes. Ils rendaient inoffensifs les composés toxiques créés par la teneur croissante en oxygène de l'atmosphère. Les précurseurs des mitochondries (*en jaune*, au centre) se sont révélés encore plus efficaces pour protéger les cellules hôtes contre l'oxy-

gène, avec comme avantage supplémentaire un approvisionnement abondant en adénosine triphosphate (ATP), des molécules riches en énergie. L'apparition des peroxysomes et des mitochondries a ensuite permis l'adoption des précurseurs des plastides, tels les chloroplastes (*en vert*, à droite), les centres de la photosynthèse productrice d'oxygène. Cette dernière étape bénéficia à la cellule hôte en lui permettant de fabriquer de la matière organique à l'aide de l'énergie de la lumière solaire.

PRÉCURSEURS DES PEROXYSONES

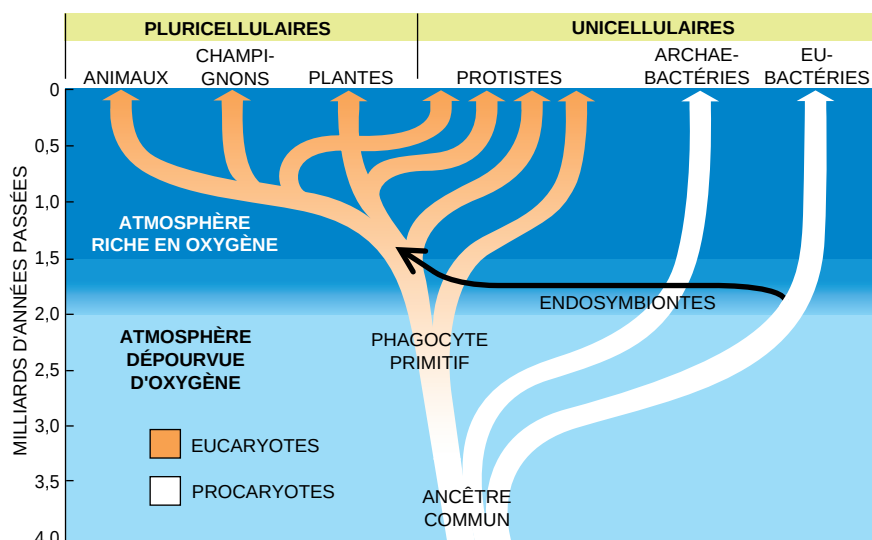


membrane externe très sinueuse, sans doute une condition nécessaire de leur volume énorme. Ainsi s'explique d'une façon simple l'une des propriétés des cellules eucaryotes : leur grande dimension.

On s'attendrait à ce que la sélection naturelle privilégiait l'expansion plutôt que la division, car des repliements auraient augmenté l'aptitude des cellules à se nourrir en créant des zones partiellement fermées – des criques étroites le long de la côte cellulaire accidentée –, où des enzymes digestives concentrées auraient dégradé les aliments plus efficacement. C'est ici qu'une étape essentielle a pu avoir lieu : étant donné que les membranes biologiques ont tendance à fusionner (comme des bulles de savon), on imagine aisément que de tels replis aient pu se refermer et se détacher sous la forme de petits sacs à l'intérieur de la cellule. Une fois ce type de mécanisme enclenché, effet secondaire plus ou moins aléatoire de l'expansion membranaire, toute modification génétique

le favorisant aurait été sélectionnée. Les criques seraient devenues des mares intérieures, où les substances nutritives auraient été piégées avec les enzymes qui les digéraient : d'extracellulaire, la digestion serait devenue intracellulaire.

Des cellules capables de capter et de traiter ainsi leur nourriture auraient beaucoup amélioré leur pouvoir d'exploiter leur environnement, accomplissant ainsi un véritable bond dans leur aptitude à survivre et à se reproduire. Elles auraient ainsi acquis les caractères fondamentaux de la phagocytose : la capture d'éléments extracellulaires par des invaginations de la membrane cellulaire (endocytose), suivie de leur dégradation dans des vésicules digestives intracellulaires (les lysosomes). Les événements évolutifs ultérieurs peuvent être considérés comme de simples perfectionnements, importants certes, mais pas essentiels. Les vésicules intracellulaires primitives ont peu à peu donné naissance à de nombreuses subdivisions



2. CET ARBRE PHYLOGÉNIQUE retrace les principaux événements de l'histoire de la vie. Cette chronologie, bien acceptée par la communauté scientifique, a été récemment remise en cause par Russell Doolittle et ses collègues de l'Université de Californie à San Diego, qui affirment que le dernier ancêtre commun de tous les organismes vivants existait il y a à peine plus de deux milliards d'années.

spécialisées, formant le système cytomembranaire, caractéristique des cellules eucaryotes modernes. Le fait qu'on trouve dans le système cytomembranaire des cellules eucaryotes de nombreux éléments qui appartiennent à la membrane cellulaire chez les procaryotes constitue un argument puissant en faveur du modèle proposé.

Fait intéressant, la genèse du noyau – apanage des cellules eucaryotes – peut aussi s'expliquer, du moins schématiquement, comme liée à l'intériorisation d'une partie de la membrane cellulaire externe. Dans les procaryotes, le chromosome d'ADN circulaire est fixé à la membrane cellulaire. Le repliement de cette portion de la membrane aurait créé un sac intracellulaire portant le chromosome à sa surface. Une telle structure pourrait avoir été à l'origine du noyau eucaryote, qu'entoure une double membrane issue d'éléments aplatis du système cytomembranaire intracellulaire, qui ont fusionné pour donner une enveloppe sphérique.

Ce scénario explique comment un petit procaryote pourrait avoir évolué en une cellule géante dotée de quelques-unes des caractéristiques des cellules eucaryotes, notamment un noyau bien délimité, un vaste réseau de membranes internes et la capacité d'ingérer de la nourriture et de la digérer intérieurement. Une telle progression aurait pu se faire par un très grand nombre d'étapes presque imperceptibles, dont chacune augmentait

l'autonomie de la cellule et lui conférait un avantage sélectif. Toutefois, il y avait une condition : ayant perdu la protection de son enveloppe externe rigide, la cellule avait besoin de supports internes suffisants pour sa taille croissante.

Les cellules eucaryotes modernes sont consolidées par des structures fibreuses et tubulaires, souvent associées à de minuscules dispositifs propulseurs qui permettent aux cellules de se déplacer et animent leur trafic intérieur. Chez les procaryotes, on ne trouve aucune des nombreuses protéines qui assurent ces fonctions. Ainsi, la mise en place du cytosquelette a dû nécessiter un grand nombre d'authentiques innovations. On ignore tout de ces événements évolutifs fondamentaux, sinon qu'ils ont vraisemblablement accompagné, souvent en en fixant l'allure, l'accroissement de la cellule et l'expansion de sa membrane.

Au terme de ce long parcours se trouvait le phagocyte primitif : une cellule organisée efficacement pour se nourrir de bactéries, un chasseur puissant qui n'était plus condamné à résider au sein de sa source alimentaire, mais qui était libre de parcourir le monde et de poursuivre activement ses proies, une cellule prête, le moment venu, à héberger des endosymbiontes.

On peut imaginer que de telles cellules, encore dépourvues de mitochondries et autres organites caractéristiques des eucaryotes d'au-

jourd'hui, aient pu coloniser des niches variées, les peuplant d'une descendance diversement adaptée. Et, cependant, la totalité – ou la quasi-totalité – de ces lignées évolutives ont disparu. On connaît quelques eucaryotes unicellulaires dépourvus de mitochondries, mais on ne peut exclure que leurs ancêtres en aient eues autrefois, puis qu'ils les aient perdues. Tous les eucaryotes pourraient donc être issus de phagocytes primitifs qui adoptèrent des précurseurs de mitochondries. Encore que la question reste sujette à discussion, on admet généralement que toutes les mitochondries ont la même origine. Il semble que l'acquisition de mitochondries ait empêché une lignée eucaryote de disparaître, ou lui ait conféré un avantage sélectif tel qu'il aurait entraîné l'extinction de presque tous les autres eucaryotes. Pourquoi les mitochondries ont-elles eu une telle importance ?

Extermination par l'oxygène

Aujourd'hui, la principale fonction des mitochondries est d'assurer la combustion des substances nutritives à l'aide d'oxygène, avec l'assemblage simultané de molécules d'adénosine triphosphate (ATP), riches en énergie. La vie est suspendue à ce mécanisme : c'est la principale source d'énergie de la grande majorité des organismes vivants, ceux dits aérobies, c'est-à-dire qui ont besoin d'air pour vivre. Pourtant, lorsque les premières cellules sont apparues sur la Terre, l'atmosphère ne contenait pas d'oxygène. L'oxygène moléculaire libre est un sous-produit de la vie et n'apparut qu'avec les cyanobactéries, des micro-organismes photosynthétiques qui utilisent l'énergie solaire pour extraire de molécules d'eau l'hydrogène qui leur est nécessaire pour l'élaboration de leur propre substance, libérant ainsi de l'oxygène moléculaire. La concentration en oxygène de l'atmosphère commença à être appréciable il y a environ deux milliards d'années, puis augmenta progressivement pour se stabiliser il y a à peu près 1,5 milliard d'années.

Avant l'apparition de l'oxygène atmosphérique, toutes les formes de vie devaient être adaptées à un milieu dépourvu d'oxygène (anaérobie) et étaient sans doute très sensibles à l'oxygène, comme le sont les organismes

anaérobies modernes. Au sein des cellules, l'oxygène donne facilement naissance à plusieurs groupes chimiques toxiques, dont l'ion superoxyde, le radical hydroxyle et le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée).

Lorsque la concentration en oxygène s'est élevée, il y a deux milliards d'années, de nombreux organismes primitifs ont vraisemblablement été victimes d'une extermination par l'oxygène. Les cellules qui ont survécu sont celles qui ont trouvé refuge dans des zones privées d'oxygène ou qui avaient acquis un moyen de résister à sa toxicité.

D'après une hypothèse attrayante, peut-être le précurseur phagocytaire des eucaryotes était-il anaérobie et dut-il son salut aux ancêtres aérobies des mitochondries, qui, non seulement pouvaient transformer l'oxygène nocif en eau inoffensive, mais en faisaient même un allié indispensable. Cette théorie expliquerait élégamment l'effet salvateur apparent des mitochondries.

Toutefois, elle soulève une question. Selon toute vraisemblance, l'adaptation à l'oxygène a dû être progressive et commencer avec des systèmes primitifs de détoxification. Elle doit avoir exigé un temps considérable pour atteindre l'efficacité des mitochondries actuelles. Cela étant, comment les phagocytes anaérobies ont-ils survécu pendant toute la période d'évolution des ancêtres des mitochondries ?

Les peroxyosomes pourraient être une réponse à cette question : ce sont des organites utilisateurs d'oxygène caractéristiques des cellules eucaryotes et aussi répandus dans le monde animal et végétal que les mitochondries, mais dont la structure et la composition sont beaucoup plus rudimentaires. Comme les mitochondries, les peroxyosomes assurent de nombreuses réactions métaboliques oxydatives, mais, contrairement aux mitochondries, ils n'utilisent pas l'énergie libérée par ces réactions pour former de l'ATP, mais la dissipent en chaleur. Pour ce faire, ils transforment l'oxygène en eau oxygénée, qui est détruite ensuite par une enzyme, la catalase. Les peroxyosomes contiennent également une enzyme qui élimine les ions superoxyde. Ce sont là des qualités qui conviennent parfaitement aux premiers défenseurs contre la toxicité de l'oxygène.

J'ai fait cette suggestion pour la première fois en 1969, alors que l'on considérait encore les peroxyosomes comme faisant partie du système cytomembranaire. J'ai donc inclus les peroxyosomes dans le modèle d'expansion membranaire que j'avais proposé pour le développement du phagocyte primitif. Ultérieurement, des expériences réalisées par mes collègues de l'Université Rockefeller, Brian Poole (aujourd'hui décédé) et Paul Lazarow, démontrèrent que les peroxyosomes sont totalement indépendants du système cytomembranaire : ils acquièrent leurs protéines par un mécanisme identique à celui qui fonctionne dans les mitochondries et les plastides. Dès lors, on pouvait imaginer que les trois types d'organites avaient d'abord été des endosymbiontes. C'est pourquoi, en 1982, j'ai modifié ma première hypothèse et proposé que les peroxyosomes proviendraient de bactéries aérobies primitives qui auraient été adoptées avant les mitochondries. Ces défenseurs primitifs auraient protégé leurs cellules hôtes contre l'oxygène toxique pendant toute la période qui a été nécessaire aux ancêtres des mitochondries pour acquérir l'efficacité qu'ils possédaient à l'époque où ils ont été adoptés.

Jusqu'à présent, aucune preuve n'est venue confirmer ni infirmer cette hypothèse. Contrairement aux mitochondries et aux plastides, les peroxyosomes ne contiennent pas de vestiges d'un génome indépendant. Toutefois, cela n'est pas incompatible avec la théorie stipulant que les peroxyosomes sont issus d'un endosymbionte : les mitochondries et les plastides ont perdu la plupart de leurs gènes au profit du noyau, et les peroxyosomes, encore plus anciens, pourraient les avoir tous perdus.

Quelle que soit leur origine, les peroxyosomes peuvent fort bien avoir permis aux premiers eucaryotes de résister à l'oxygène, ce qui expliquerait leur omniprésence. L'adoption ultérieure des mitochondries s'expliquerait par le gain d'énergie utilisable assuré par le couplage de la consommation d'oxygène à la formation d'ATP. Les mitochondries ont en outre l'avantage de maintenir la concentration environnante en oxygène très inférieure à celle qu'assurent les peroxyosomes.

Pourquoi les peroxyosomes n'ont-ils pas disparu après la mise en place

LA FIN DU MONDE ANTÉDILUVIEN

*Livre de F. R. Trestournel
de 216 pages, 29 figures
et 8 hiéroglyphes en couleurs.
Où il est montré et démontré qu'à l'extrême fin du Tertiaire, une planète a fracassé la Terre primitive (l'Éden) :*

- *la dérive des continents*
- *la surrection du grand Plissement alpin*
- *la formation des océans, de l'océan Pacifique et des guirlandes d'îles circumpacifiques*
- *l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre...*
- *le déluge ; l'origine des sentiments religieux et des religions monothéistes : juive, chrétienne et islamique.*

*Commandez ce livre
à votre libraire ou aux
Éditions Charles Corlet
14110 Condé-sur-Noireau
Prix : 100F*

des mitochondries ? Il est vraisemblable que, lorsque les cellules eucaryotes ont acquis leurs mitochondries, certaines activités des peroxy-somes, par exemple le métabolisme de certains acides gras, étaient devenues tellement vitales que la sélection naturelle ne les a pas éliminés. C'est pourquoi on trouve aujourd'hui peroxy-somes et mitochondries ensemble dans la plupart des eucaryotes.

Les plastides sont d'autres organites issus d'endosymbiontes ; les principaux représentants en sont les chloroplastes, ces organites verts assurant la photosynthèse des algues unicellulaires et des végétaux pluricellulaires. Les plastides dérivent de cyanobactéries, les procaryotes responsables de la crise de l'oxygène. Ils ont probablement été adoptés comme endosymbiontes après les mitochondries. Les avantages sélectifs qui ont favorisé l'adoption d'endosymbiontes photosynthétiques sont évidents : des cellules qui, auparavant, avaient eu besoin d'un approvisionnement régulier en substances nutritives se contentaient désormais d'air, d'eau, de quelques minéraux solubles et de lumière. En réalité, on a la preuve que l'acquisition de plastides par des cellules eucaryotes a eu lieu indépendamment au moins trois fois, ce qui a donné naissance aux algues vertes, aux algues rouges et aux algues brunes. Les membres du premier groupe ont donné les végétaux pluricellulaires.

De la prison à l'esclavage

Ce qui fut d'abord une trêve fragile devint bientôt un esclavage progressif des endosymbiontes prisonniers de leurs hôtes phagocytaires. Cet asservissement fut accompli par le transfert de la plupart des gènes des endosymbiontes dans le noyau de la cellule hôte. En soi, la capture de gènes par un noyau n'est pas extraordinaire. Quand on introduit des gènes étrangers dans le cytoplasme d'une cellule (comme dans les expériences de biotechnologie), ils pénètrent dans le noyau et y fonctionnent : ils se répliquent au cours de la division cellu-



3. QUATRE ORGANITES sont visibles dans une cellule de feuille de tabac. Les deux chloroplastes (à gauche et en bas) et la mitochondrie (au centre, à droite) sont issus d'endosymbiontes procaryotes. Le peroxy-some (au centre), qui contient une volumineuse inclusion cristalline, sans doute constituée d'une enzyme, la catalase, pourrait provenir également d'un endosymbionte.

laire et s'expriment sous la forme des protéines correspondantes. Toutefois, la migration de gènes d'endosymbiontes vers le noyau est étonnante, car elle semble avoir soulevé plus de difficultés qu'elle n'en a résolues. Une fois les gènes transférés, les protéines qu'ils codaient ont commencé à être synthétisées dans le cytoplasme de la cellule hôte, où s'élaborent tous les produits des gènes nucléaires. Ces molécules ont dû migrer à l'intérieur de l'endosymbionte pour être utiles. Ce scénario, en apparence improbable, a non seulement résisté aux aléas de l'évolution, mais s'est même révélé si avantageux que tous les endosymbiontes qui avaient conservé des copies des gènes transférés finirent par disparaître.

Aujourd'hui, les mitochondries, les plastides et les peroxy-somes acquièrent leurs protéines du cytoplasme environnant avec l'aide de structures de transport complexes localisées dans leurs membranes. Ces structures reconnaissent des portions de protéines nouvellement synthétisées comme des « étiquettes » spécifiques de chaque organite. La machinerie de transport permet alors aux molécules concernées de traverser la membrane avec l'aide d'énergie et de protéines spécialisées, qui ont reçu le nom suggestif de chaperons. Ces systèmes de transport qui font pénétrer dans les organites des protéines synthétisées à l'extérieur

sont peut-être issus de systèmes servant à la sécrétion des protéines, qui étaient présents originellement dans les membranes des endosymbiontes. Alors la polarité des systèmes a dû être inversée, dirigée désormais de l'extérieur vers l'intérieur.

L'adoption d'endosymbiontes a certainement joué un rôle essentiel dans la naissance des eucaryotes. Toutefois l'événement clé, celui qui a requis beaucoup plus d'innovations évolutives, a été le mécanisme long et mystérieux qui a rendu ces acquisitions possibles : la lente transformation, pendant un milliard d'années ou plus, d'un ancêtre procaryote en un

gros microbe phagocytaire doté de la plupart des attributs des cellules eucaryotes modernes. La science commence à lever le voile qui entoure cette transformation prodigieuse sans laquelle une bonne part du monde vivant, dont l'homme, n'existerait pas.

Christian de DUVE a partagé le prix Nobel de physiologie ou de médecine, en 1974, avec Albert Claude et George Palade pour « leurs découvertes concernant l'organisation structurale et fonctionnelle des cellules ». Il est professeur émérite de biochimie à l'Université de Louvain et à l'Université Rockefeller, à New York. En Belgique, il a fondé l'*International Institute of Cellular and Molecular Pathology* (ICP).

Christian de DUVE, *Les microcorpuscules de la cellule vivante*, in *Pour la Science*, n° 69, juillet 1983.

Christian de DUVE, *Une visite guidée de la cellule vivante*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1987 ; collection « L'Univers des Sciences », éditions *Pour la Science*, diffusion Belin, Paris, 1987.

T. CAVALIER-SMITH, *The Origin of Eukaryote and Archaeobacterial Cells*, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 503, pp. 17-54, juillet 1987.

Christian de DUVE, *Construire une cellule : Essai sur la nature et l'origine de la vie*, De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1990 ; InterÉditions, Paris, 1990.

Christian de DUVE, *Poussière de vie : Une histoire du vivant*, Éditions Fayard, Paris, 1996.
