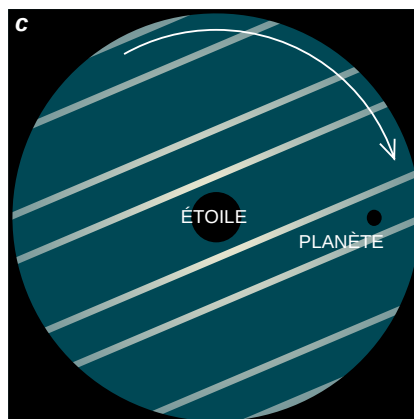
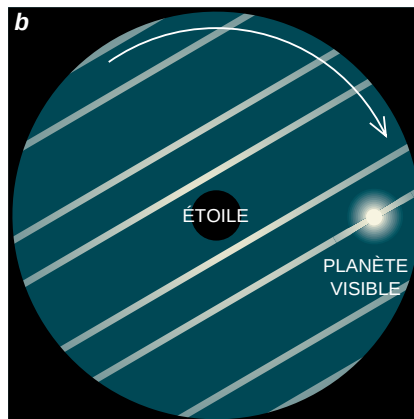
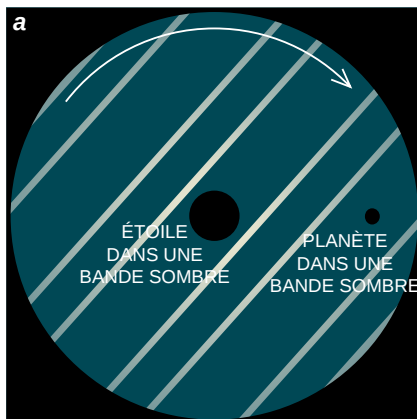
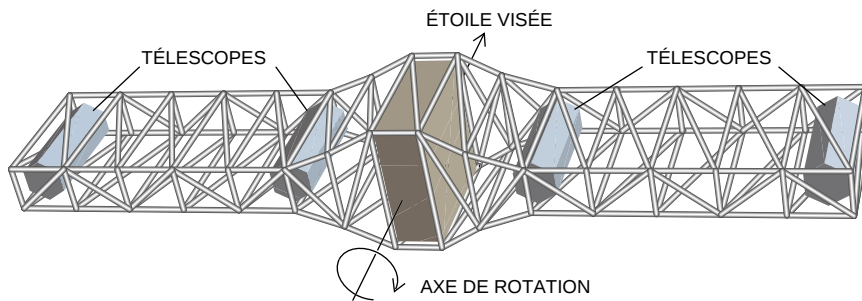




5. UN INTERFÉROMÈTRE ROTATIF pourrait révéler l'existence d'une planète autour d'une étoile lointaine. Les quatre télescopes produiraient une vue du ciel partiellement obscurcie par de nombreuses bandes ; l'étoile à masquer serait dissimulée par une bande. Lors d'une rotation de l'interféromètre autour 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.

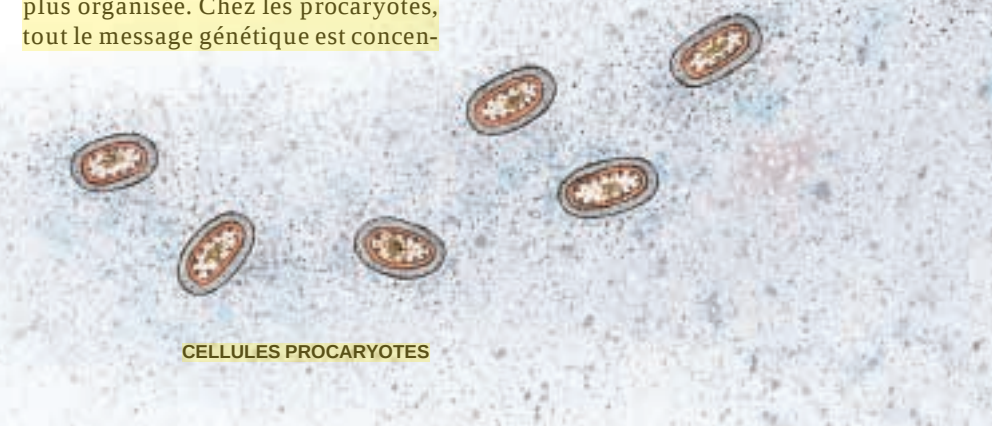
Les cellules eucaryotes proviennent sans doute de cellules procaryotes ancestrales, mais on ignore comment s'est effectué le passage, car aucun intermédiaire de cette transition n'a survécu ni laissé de fossiles, témoins directs. On ne peut qu'observer le produit final eucaryote, totalement différent 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 EU-CARYOTES 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.

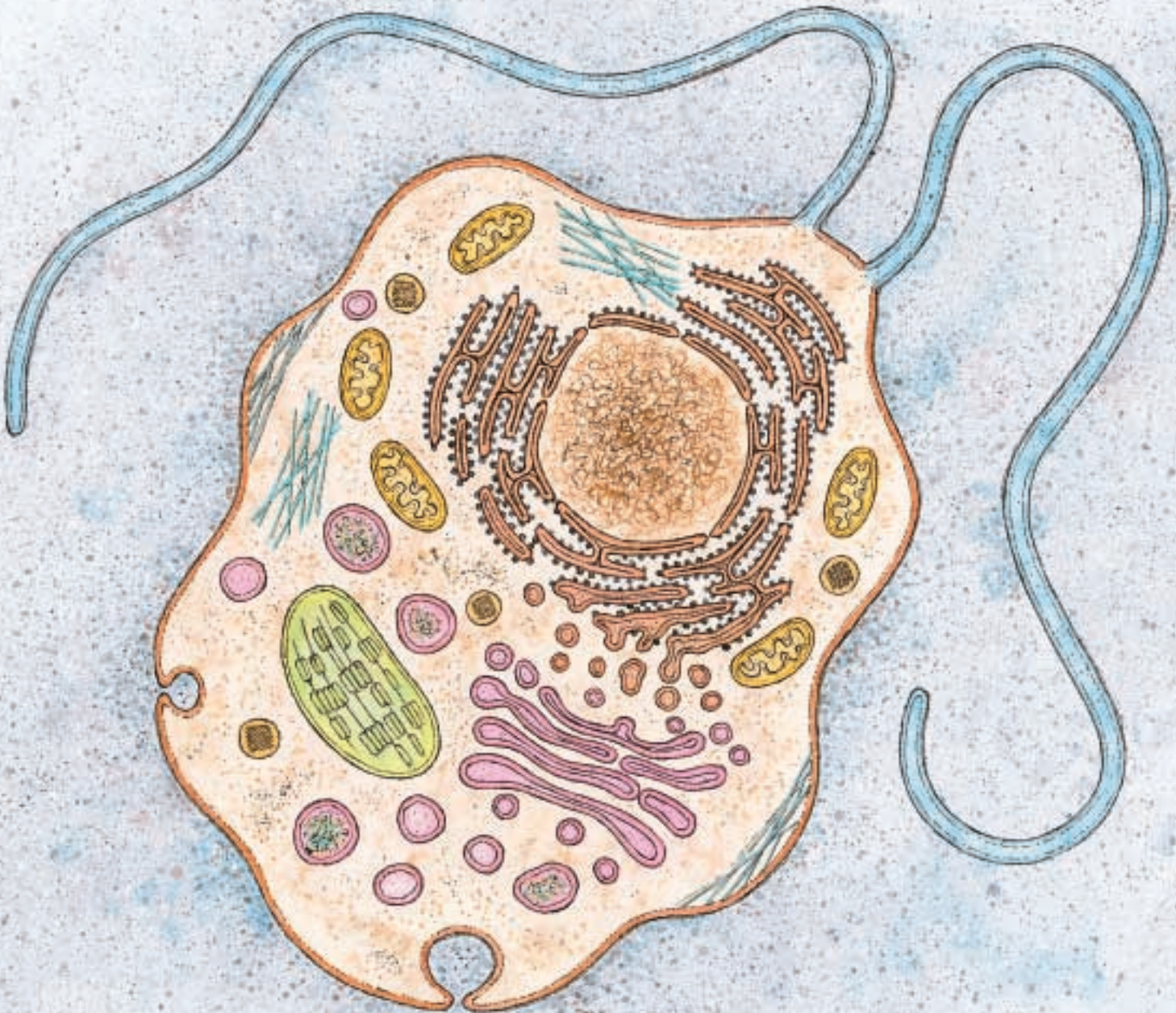
L'organisation des cellules procaryotes est beaucoup plus rudimentaire. Néanmoins, les deux types cellulaires sont indéniablement apparentés. C'est ce que démontrent leurs nombreuses similitudes génétiques. Celles-ci ont même permis de dater approximativement le moment où la branche eucaryote de l'arbre 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

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

PAROI CELLULAIRE

BOUCLE D'ADN

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-