

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 circumparallèles*
- *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.
