

Sommes-nous constitués d'une association de procaryotes ?

Auteur : Bruno DE REVIERS

Professeur, Muséum national d'histoire naturelle
Institut de Systématique, Évolution, Biodiversité
Équipe Exploration, Espèces et Évolution (3E)
Paris

En 1925, le zoologiste Édouard Chatton publie une classification dans laquelle les « bactéries » au sens de l'époque (nommées procaryotes) sont considérées comme fondamentalement différentes de tous les autres êtres vivants (nommés eucaryotes). L'origine de ces noms résulte de la nature compartimentée des cellules eucaryotes : leur matériel génétique est notamment contenu dans un noyau délimité par une enveloppe constituée de deux membranes et *eu-karyon*, en grec, signifie « vrai noyau ». L'ADN des procaryotes, au contraire, est situé directement dans une zone du cytosol non délimitée par une membrane (le grec *pro-karyon* signifiant « avant le noyau »).

Par la suite, le développement des techniques permettra d'approfondir notre connaissance des cellules eucaryotes. Elles possèdent un réseau membranaire interne, le réticulum endoplasmique. La respiration cellulaire s'effectue dans les mitochondries et, chez les végétaux, la captation de l'énergie lumineuse pour produire de la matière carbonée (la photosynthèse) se situe dans les plastes. Des protéines particulières, les histones, sont liées à l'ADN. Des mouvements internes sont possibles grâce à un réseau complexe de filaments et de tubules, qui permet aussi la division cellulaire par mitose ou méiose. Dans les cellules des procaryotes : pas de mitochondries, pas de plastes, pas de mouvements internes et une division cellulaire par simple bipartition.

La forte ressemblance des plastes et des mitochondries avec des bactéries, ainsi que l'observation que ces organites se divisent, comme elles, par bipartition, feront soupçonner, notamment par Andreas Schimper dès la fin du XIX^e siècle, qu'ils seraient en fait des procaryotes installés dans nos cellules et ayant co-évolué avec elles. Cette hypothèse connue sous le nom de théorie de l'endosymbiose sera largement démontrée par toute une série d'études, en particulier par l'analyse des séquences génétiques car ces compartiments abritent encore un génome bactérien résiduel. On va ainsi montrer que la mitochondrie dérive d'une bactérie alpha-pourpre, et le plaste d'une bactérie capable d'effectuer la photosynthèse productrice d'oxygène : une cyanobactérie. Leur génome résiduel est encore capable de synthétiser quelques protéines, mais 90 % de celui-ci a soit été transféré dans le noyau de la cellule hôte, soit perdu. La cellule qui les accueille profite de l'énergie produite par la respiration et/ou des sucres produits par photosynthèse ; elle assure en échange un abri et un environnement stable à ces bactéries. Cette association à bénéfices réciproques est une symbiose, devenue héréditaire.

En analysant des séquences d'ADN, à l'échelle de tout le vivant, des biologistes américains de l'université de l'Illinois, Carl R. Woese et son collaborateur George E. Fox, de l'*Institute for Genomic Biology*, vont découvrir en 1977 qu'à côté des eucaryotes, coexistent non pas une mais deux catégories de procaryotes très différentes entre-elles. En 1990, C. Woese désignera les trois ensembles sous le nom de domaines : Archaea (archées), Bacteria (bactéries) et Eukarya (eucaryotes). Les progrès grandissants de l'analyse comparée des génomes vont ensuite conduire au constat que les gènes impliqués dans le métabolisme général des cellules eucaryotes sont d'origine bactérienne, tandis que ceux liés aux processus de réplication et de réparation de l'ADN ainsi que de la traduction des acides nucléiques en protéines sont d'origine archéenne. Des homologues des histones et de protéines impliquées dans la déformation cellulaire et la

phagocytose, que l'on croyait propres aux eucaryotes, vont ensuite être identifiés chez les archées. La découverte des Lokiarcheota dans un champ de sources hydrothermales profond (le Château de Loki, situé dans l'océan Atlantique, entre le Groenland et la Norvège) et l'étude comparée des génomes vont finalement conduire, en 2015, les chercheurs de l'université d'Uppsala à désigner les eucaryotes comme descendant des archées, limitant le vivant à deux domaines : Bacteria et Archaea, ce dernier incluant les eucaryotes.

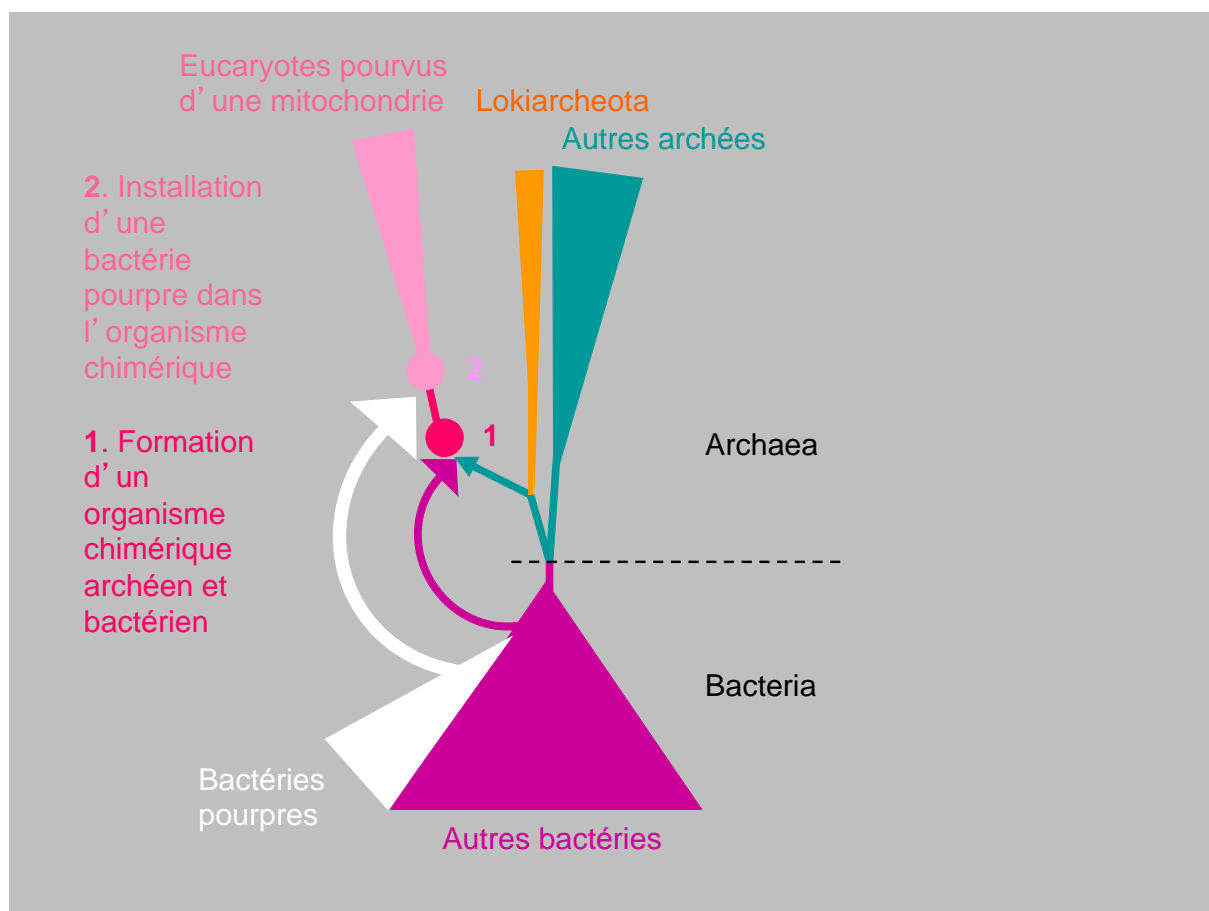


Figure 1. Origine hypothétique des cellules eucaryotes. 1. Une archée proche des Lokiarcheota s'associe avec une bactérie pourpre pour former un organisme chimérique. 2. Une relation d'endosymbiose se met en place entre cet organisme chimérique et une bactérie pourpre installée dans son cytoplasme. Les deux partenaires de cette symbiose vont co-évoluer au point que la bactérie pourpre va devenir un compartiment cellulaire : la mitochondrie.

L'histoire des cellules eucaryotes apparaît comme celle de cellules archéennes ayant acquis une énorme proportion de gènes bactériens, en partie comme conséquence de la mise en place de l'endosymbiose avec la bactérie qui deviendra la mitochondrie. La seule association de la future mitochondrie et d'une archée ne suffit cependant pas à expliquer tout le contenu génétique des eucaryotes, d'autres apports ont été nécessaires. Les bactéries et les archées sont capables de se transférer des portions de génome grâce à ce qu'on nomme la pseudosexualité. Contrairement aux eucaryotes dont la sexualité n'est possible qu'entre espèces très voisines, ces échanges peuvent avoir lieu entre individus extrêmement éloignés. Des archées et des bactéries peuvent ainsi se transférer des gènes et, également en 2015, des chercheurs allemands de l'*Institute of Molecular Evolution* (Düsseldorf) ont découvert qu'il existait cinq fois plus de transferts depuis les bactéries vers les archées que l'inverse, au point que ces apports bactériens avaient contribué à la

diversification des archées au cours de leur évolution. Ces transferts où les gènes ne sont pas hérités des parents mais d'espèces pouvant être plus ou moins éloignées, parfois à l'extrême, sont dits « latéraux », par opposition aux héritages « verticaux » en provenance des cellules parentes. Grâce à ce processus, l'ancêtre des eucaryotes a bénéficié massivement de transferts latéraux de gènes et ainsi de voies métaboliques très diversifiées. Ces transferts ont eu lieu avant l'endosymbiose avec la mitochondrie, au travers de cette endosymbiose, mais peut-être encore après car il n'est pas possible de dire à quel moment cet organisme a perdu cette capacité d'échange de gènes, remplacée par la sexualité.

Toutes ces découvertes ne rendent cependant pas encore parfaitement compte de la nature complexe des cellules eucaryotes. Il faut en effet expliquer en leur sein la présence de membranes d'origines bactériennes et non archéennes. David Moreira et Purificación López-García (université de Paris-Sud) avaient suggéré en 1998 que des populations symbiotiques d'archées et de bactéries aux métabolismes complémentaires sur le plan de leur nutrition aient pu aboutir à la formation d'un organisme chimérique doté d'un système membranaire externe et interne dérivé de membranes bactériennes. L'installation de la bactérie à l'origine de la mitochondrie dans cet organisme se serait produite ultérieurement. L'étude phylogénomique de 2016 effectuée par Alexandros A. Pittis et Toni Gabaldón (université de Barcelone), montrant l'acquisition de la mitochondrie après la formation d'une cellule d'origine en partie archéenne et bactérienne va dans ce sens. C'est probablement un tel ménage à trois (archée & bactérie associées accueillant la future mitochondrie), qui a été à l'origine de nos cellules eucaryotes.

Quel que soit le scénario retenu, créatures marines, terrestres, humains, nous, eucaryotes, serions constitués de cellules dérivées d'une association de procaryotes.

Pour en savoir plus

- [1] López-García P. & Moreira D., 2015. Review. Open Questions on the Origin of Eukaryotes. *Trends in Ecology & Evolution*, 30 (11) : 697-708.
- [2] Nelson-Sathi S., Sousa F.L., Roettger M., Lozada-Chávez N., Thierygart T., Janssen A., Bryant D., Landan G., Schönheit P., Siebers B., McInerney J.O. & Martin, W.F., 2015. Origins of major archaeal clades correspond to gene acquisitions from bacteria. *Nature*, 517 : 77-80.
- [3] Pittis A.A. & Gabaldón T., 2016. Late acquisition of mitochondria by a host with chimaeric prokaryotic ancestry. *Nature*, 531 : 101-104.
- [4] Spang A., Saw J.H., Jørgensen S.L., Zaremba-Niedzwiedzka K., Martijn J., Lind A.E., Eijk R. van, Schleper C., Guy L. & Ettema T.J.G., 2015. Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes. *Nature*, 521 : 173–179.

L'auteur remercie Purificación López-García et Florence Rousseau pour leur relecture de ce texte.