

par erreur dans le génome de *Lokiarchaeon*. Les chercheurs qui l'ont reconstruit ont écarté cette crainte en montrant que sur les segments d'ADN séquencés et réassemblés, les gènes de type eucaryote voisinent avec des gènes typiques des archées tout en ne contenant pas d'introns eucaryotes, c'est-à-dire de rubans d'ADN non codant intercalés entre les gènes spécifiques des eucaryotes. Cela dit, reconstruire pour la première fois le génome d'un organisme inconnu définissant une lignée nouvelle est une affaire délicate, de sorte que la possibilité d'un certain degré d'erreur ne peut être totalement écartée.

PLS

Que faire pour mieux nous fixer les idées ?

S. G. : Il va falloir avancer sur plusieurs fronts. D'un côté, il sera important d'essayer d'isoler un membre des *Lokiarchaeota*. Cela permettra d'une part d'obtenir un génome complet et vérifié, d'autre part d'observer ses cellules par microscopie afin de déterminer à quel point elles ressemblent à des cellules eucaryotes, par exemple si elles ont un cytosquelette développé. Il sera aussi essentiel d'obtenir des nouveaux génomes de *Lokiarchaeota* ainsi que de lignées d'archées proches. Cela permettra de mieux définir la présence de gènes eucaryotes chez ces archées, et de préciser les relations de parenté les reliant aux eucaryotes.

PLS

Quelles nouvelles questions poser à ces données, une fois que nous les aurons ?

S. G. : Le portrait de la cellule hôte qui a accueilli la bactérie à l'origine des mitochondries reste énigmatique. S'agissait-il d'une simple cellule d'archée ou d'une forme déjà intermédiaire entre procaryote et eucaryote ? Combien de gènes à l'origine des innovations spécifiques aux eucaryotes proviennent des archées ? Et par ailleurs, quel est le rôle de ces gènes de type eucaryote chez les archées, et pourquoi seulement certaines lignées en contiennent-elles ? Trouvera-t-on une archée encore plus proche des eucaryotes que *Lokiarchaeon* ? Quoi qu'il en soit, nous ne sommes qu'au début d'une grande quête scientifique. Les archées n'ont pas fini de nous surprendre ! ■

Les eucaryotes sont-ils aussi concernés par les sauts de gènes ? Comme nous l'avons déjà dit, la cellule eucaryote est pourvue d'un noyau. Contenant le génome, c'est-à-dire tous les gènes, ce noyau est séparé du cytoplasme par une membrane jouant un rôle fondamental dans la régulation du fonctionnement du génome et de la cellule eucaryote.

Le noyau cellulaire est par ailleurs l'exemple même de la tendance évolutive vers une compartimentation de la cellule. L'apparition de compartiments à l'intérieur de la cellule a favorisé la spécialisation de complexes enzymatiques qui ont fini par

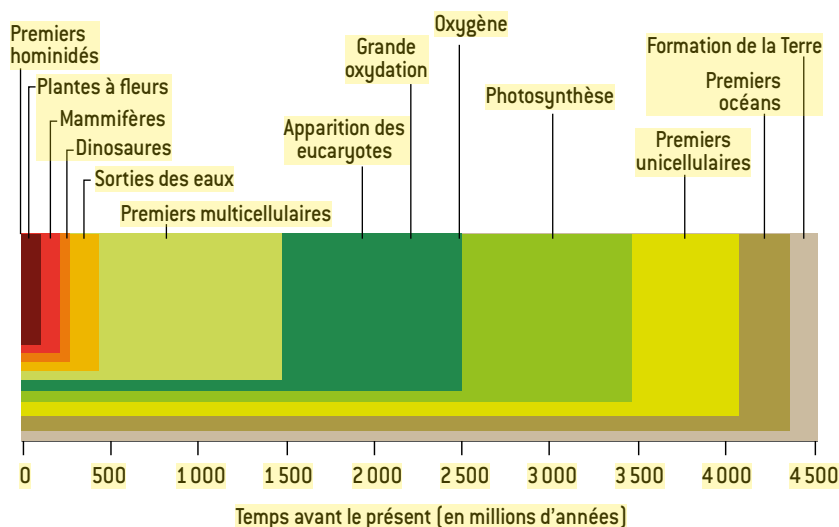
L'apparition de compartiments à l'intérieur de la cellule a augmenté l'efficacité métabolique et structurale

donner des organites. Ces sous-structures cellulaires spécialisées dans certaines fonctions augmentent l'efficacité métabolique et structurale de la cellule. C'est la compartimentation au sein de la cellule qui explique l'explosion de complexité qui s'est produite chez les eucaryotes il y a environ 1,8 milliard d'années. Cette radiation évolutive a d'abord produit des organismes unicellulaires eucaryotes, tels que les amibes et levures, et enclenché l'évolution vers les eucaryotes multicellulaires.

Or le fonctionnement de ces structures cellulaires plus complexes requiert davantage d'énergie. Celle-ci est produite par des organites qui ont sans doute des origines endosymbiotiques. En effet, à l'intérieur de toutes les cellules eucaryotes, il existe des organites ayant leur propre membrane et leur propre génome : les mitochondries. La mitochondrie est spécialisée dans la production de l'adénosine triphosphate (ATP), une molécule qui contient l'énergie chimique à l'origine du métabolisme, nécessaire à la croissance et à la division cellulaire. Cet organite serait le vestige d'une alpha-protéobactérie (un type de bactérie mobile) ingérée par une autre cellule, par phagocytose probablement, ce qui aurait créé une relation mutuellement profitable entre les deux espèces.

Cette relation d'origine écologique aurait ensuite évolué pour devenir physiologique, au point d'entraîner l'apparition puis l'évolution d'une nouvelle branche de la vie, celle des eucaryotes. Comment tout cela a-t-il pu avoir lieu ?

Les mitochondries seraient apparues avec le transfert de la plupart des gènes de l'alpha-protéobactérie vers le génome de son hôte phagocyte (voir la figure page 37). Ce transfert de type horizontal, accompagné de la perte des gènes ne conférant pas un avantage sélectif, aurait entraîné une réduction de la taille et de la complexité du génome mitochondrial, qui est passé de 1 600 gènes dans l'alpha-protéobactérie



LES HISTOIRES DE LA TERRE ET DE LA VIE sont résumées ci-dessus par quelques étapes essentielles : soit des événements géologiques fondateurs pour le milieu de vie qu'est la Terre, soit des innovations majeures apparues dans le monde vivant. Il apparaît que la vie a été très longtemps uniquement bactérienne et qu'elle est presque aussi ancienne que la Terre.

ancestrale à environ 67 dans la mitochondrie moderne. Conséquence : l'asservissement de l'alpha-protéobactérie et son incorporation comme organite dans la cellule eucaryote.

Le transfert des gènes bactériens vers le génome du noyau eucaryote s'explique par un taux de mutations supérieur dans le génome bactérien, comparé au génome nucléaire, dont la stabilité dans le temps est essentielle pour l'héritage de l'information génétique. Cette stabilité a rendu avantageux le transfert de la plupart des gènes mitochondriaux vers le génome nucléaire. Ce type de transfert horizontal de gènes s'est probablement produit plusieurs fois au cours de l'évolution des eucaryotes.

Même si les transferts de gènes horizontaux chez les eucaryotes sont rares, ils jouent un rôle évolutif significatif. Même si chez les bactéries, environ 80 % des gènes ont été acquis par transfert horizontal, chez les eucaryotes les transferts de ce type restent des événements très anciens et dont l'ampleur est difficile à estimer. On trouve cependant des exceptions chez des espèces dont les œufs sont exposés à des microorganismes, ce qui est le cas de différents insectes, vers, poissons ou plantes. Toutefois, chez ces eucaryotes, les transferts horizontaux de gènes se limitent à un ou deux gènes par espèce, qui apportent un avantage bien spécifique.

L'observation que des gènes provenant de différentes branches de l'arbre de la vie font partie des génomes eucaryotes a bouleversé l'idée reçue suivant laquelle l'évolution des eucaryotes, et en particulier

celle des animaux, procède exclusivement par transmission verticale des mutations et par des remaniements génétiques au cours de la reproduction. Or c'est cette idée reçue qui est compatible avec l'arbre de la vie tel que l'a imaginé Darwin, où les diverses branches proviennent d'un seul tronc commun. En réalité, l'arbre phylogénétique des plantes et des animaux ressemble, surtout à sa base, plutôt à une sorte de vigne buissonnante imbriquant et reliant les trois grandes branches du vivant (voir la figure pages 32-33). Les mécanismes de ces transferts génétiques latéraux restent à préciser.

D'autres voies de transfert horizontal ?

Lors de l'évolution des plantes et des animaux, certains compartiments de ces organismes, tels que les systèmes digestif et reproductif, ont été colonisés par des communautés étendues de bactéries et de champignons (entre autres). Les plantes et les animaux vivent en symbiose avec ces microbiotes, qui leur donnent plusieurs avantages, notamment sur le plan immunitaire et digestif. Le transfert horizontal des gènes est particulièrement important au sein des microbiotes, qui évoluent ainsi en réponse aux conditions environnementales offertes par l'organisme hôte.

Réciproquement, le transfert de gènes au sein des microbiotes peut aussi faciliter l'adaptation de l'organisme hôte à un environnement incertain et fluctuant. Ainsi, un transfert des gènes entre un parasite microbien des algues et une bactérie du microbiote intestinal caractéristique de la population japonaise a favorisé la digestion des algues par les Japonais. Le transfert des gènes et son rôle dans l'évolution des eucaryotes existent donc à deux échelles : au niveau cellulaire par l'endosymbiose et au niveau du microbiote par la symbiose entre l'organisme et les microbes qu'il héberge.

Tout ce que nous venons d'évoquer montre que, désormais, l'évolution des espèces doit être envisagée en tenant compte de la proximité dans laquelle les formes vivantes ont toujours évolué et continuent à le faire. Cette proximité est particulièrement forte avec les microorganismes, dont nous commençons à peine à connaître l'immense diversité. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. A. Hug *et al.*, A new view of the tree of life, *Nature Microbiology*, vol. 1, pp. 1-6, 2016.

A. Spang *et al.*, Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes, *Nature*, vol. 521, pp. 173-179, 2015.

N. Shterzer et I. Mizrahi, The animal gut as a melting pot for horizontal gene transfer, *Can. J. Microbiol.*, vol. 61, pp. 603-605, 2015.

S. M. Soucy *et al.*, Horizontal gene transfer: building the web of life, *Nature Reviews Genetics*, vol. 16, pp. 472-482, 2015.