

Lokiarchaeon, un chaînon manquant entre archées et eucaryotes ?

Entretien avec Simonetta Gribaldo



Simonetta GRIBALDO, biologiste de l'évolution, dirige à l'institut Pasteur une équipe étudiant l'évolution des microorganismes et l'arbre du vivant.

Une équipe de chercheurs vient de séquencer le génome d'une lignée d'archées non cultivées vivant dans les sédiments froids et anoxiques entourant le château de Loki, une source hydrothermale située sous l'Atlantique norvégien. Or les chercheurs ont découvert dans le génome de cet organisme nommé *Lokiarchaeon* (de la famille *Lokiarchaeota*) un grand nombre de gènes que l'on ne trouve normalement que chez les eucaryotes. En outre, quand ils ont placé *Lokiarchaeon* dans l'arbre du vivant, ils ont trouvé que cet organisme y apparaît comme le parent le plus proche des eucaryotes. Cette constatation a amené les chercheurs à voir dans *Lokiarchaeon* une forme intermédiaire entre archées et eucaryotes.

POUR LA SCIENCE

Quel est le contexte épistémologique de la découverte des *Lokiarchaeota* ?

SIMONETTA GRIBALDO : L'origine de la première cellule eucaryote est depuis longtemps l'une des grandes questions de la biologie évolutive. Or les chercheurs ont remarqué depuis les années 1970 une très grande similarité entre les mécanismes cellulaires fondamentaux des archées et ceux des eucaryotes : même type de réplication du matériel génétique ou encore de traduction des gènes en protéines... Deux écoles de pensée se sont développées afin de rendre compte de ces ressemblances. Dans la première, on soutient que les eucaryotes et les archées dérivent d'un ancêtre commun, dont la nature reste à déterminer ; dans la seconde, que les eucaryotes seraient véritablement

apparentés à une lignée spécifique d'archées. Au cours des dernières années, les résultats de l'exploration de la biodiversité des archées et de l'amélioration des méthodes de reconstruction des liens de parenté au sein du vivant ont plutôt été en faveur du second scénario. Pour autant, la distance évolutive entre archées et eucaryotes demeure très grande, et il reste à comprendre comment et dans quel ordre les traits caractéristiques de la cellule eucaryote – noyau, mitochondrie, phagocytose, compartimentage complexe, etc. – ont émergé.

PLS

Pourquoi *Lokiarchaeon* a-t-il suscité un tel intérêt ?

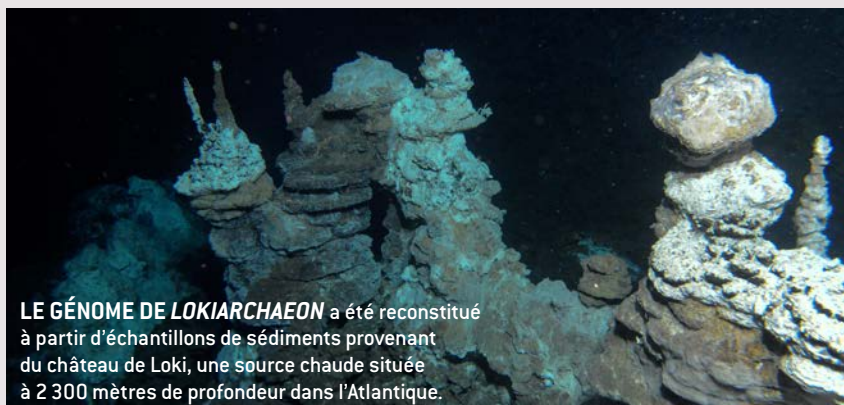
S.G. : Parce qu'il pourrait représenter le point de départ du processus évolutif qui a mené à la toute première cellule eucaryote. Sa caractérisation peut donc fournir des informations précieuses sur l'origine, il y a deux milliards d'années, de la lignée à laquelle nous appartenons. Par exemple, certains des

gènes identifiés dans le génome de *Lokiarchaeon* sont impliqués chez les eucaryotes dans la formation du cytosquelette (polymères conférant de la rigidité à la cellule) et la phagocytose (l'ingestion de particules étrangères). Loin de suggérer que *Lokiarchaeon* est une cellule de type eucaryote capable d'englober d'autres cellules, cette découverte laisse penser que le potentiel génétique qui a servi à développer certains caractères eucaryotes était déjà présent chez les archées.

PLS

Certains chercheurs doutent de ces résultats. Pourquoi ?

S.G. : Le génome de *Lokiarchaeon* a été réassemblé par voie bio-informatique à partir d'un métagénome, c'est-à-dire de l'assemblage de tous les fragments d'ADN provenant d'organismes non cultivés se trouvant dans cet échantillon de sol océanique. Il est donc possible que des gènes d'eucaryotes présents dans le même échantillon aient été introduits



LE GÉNOME DE *LOKIARCHAEON* a été reconstitué à partir d'échantillons de sédiments provenant du château de Loki, une source chaude située à 2 300 mètres de profondeur dans l'Atlantique.

© Université de Bergen, Norvège

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