

Fille du géant Typhon et de la femme serpent Echidna, Chimère est une créature mythologique qui associe une tête de lion, un corps de chèvre et une queue de serpent. Cette créature est assurément mythique : aucun être vivant ne saurait combiner plusieurs espèces. Et pourtant... Dans la nature, il arrive que des matériels génétiques différents fusionnent : issus d'espèces différentes, beaucoup d'organismes vivants sont des chimères.

Cette conception semble en désaccord avec la représentation que beaucoup de biologistes se font de l'origine des espèces, c'est-à-dire de la spéciation. Dans son ouvrage publié en 1859, Charles Darwin propose que les espèces apparaissent par divergence à partir d'un ancêtre commun ; selon la théorie néodarwinienne de l'évolution, développée au XX^e siècle avec l'étude de la transmission des gènes dans les populations, cette divergence procède

ne sont pas nouveaux en eux-mêmes, mais c'est leur contribution à l'évolution que nous soulignerons ici, en nous appuyant notamment sur les résultats récents de l'étude des génomes. Ces dernières années, les généticiens ont par exemple découvert que la plupart des plantes à fleurs sont apparues à la suite de croisements entre espèces, preuve que l'hybridation est une source importante de diversité biologique. De même, on se rend compte aujourd'hui que les transferts de gènes entre espèces sont plus fréquents qu'on ne le croyait. Hybridation et transferts de gènes font apparaître des lignées et des espèces nouvelles.

Après avoir rapidement rappelé comment l'évolution par fusion a été découverte, nous examinerons ses trois principales modalités : la fusion par endosymbiose, l'hybridation et les transferts de gènes. Nous proposerons alors une

L'arbre de l'évolution porte des branches qui se ramifient au fil du temps. Mais pas seulement : par un mécanisme dit d'évolution par fusion, certaines branches fusionnent parfois avant de diverger à nouveau.

par accumulation de mutations génétiques. C'est pourquoi les livres de biologie présentent le plus souvent l'histoire du vivant sous forme d'arbres ramifiés, dits phylogénétiques, où des nœuds représentent des espèces ancestrales qui ont divergé en deux rameaux (voire davantage), portant chacun les espèces qui en sont issues.

Cette vision rend compte de nombreux cas de spéciation, mais elle omet le rôle de phénomènes qui impliquent la fusion de matériels génétiques provenant d'espèces différentes, à l'image des cours d'eau dont les bras fusionnent pour former un réseau fluvial (voir la figure 1).

Les mécanismes d'acquisition du matériel génétique d'une espèce par une autre

conception synthétique de l'origine des espèces en tenant compte de ces mécanismes d'évolution par fusion.

L'idée d'une évolution par fusion a été envisagée dès la fin du XIX^e siècle. En 1883, le botaniste allemand Andreas Schimper s'interroge sur les organites cellulaires des plantes contenant la chlorophylle, les plastes : « Peut-être une plante verte n'est-elle que l'union entre un organisme incolore et un microbe possédant des pigments chlorophylliens. » En 1905, le Russe Konstantin Mereschkowsky consacre un livre entier à la théorie de la « symbiogenèse », selon laquelle la fusion de deux organismes est le moteur de l'évolution. Faute de preuves, cette théorie tombe ensuite en désuétude.

Elle ne reviendra sur le devant de la scène qu'en 1970 avec la biologiste américaine Lynn Margulis. Dans *L'origine des cellules eucaryotes* – les eucaryotes sont les organismes dont l'ADN est contenu dans un noyau –, elle affirme que certaines parties des cellules eucaryotes sont en fait des bactéries. Celles-ci vivraient en symbiose dans les cellules, c'est-à-dire en entretenant une relation réciproquement

1. UN RÉSEAU FLUVIAL, tel celui du delta du fleuve Léna, en Sibérie, illustre la façon dont les espèces évoluent : certaines espèces divergent, puis convergent par des mécanismes d'évolution par fusion, avant de diverger à nouveau. L'évolution des espèces ne serait pas qu'une suite de divergences à partir d'un ancêtre commun, mais une succession de divergences émaillées de fusions.

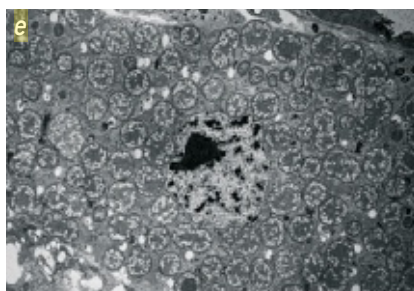
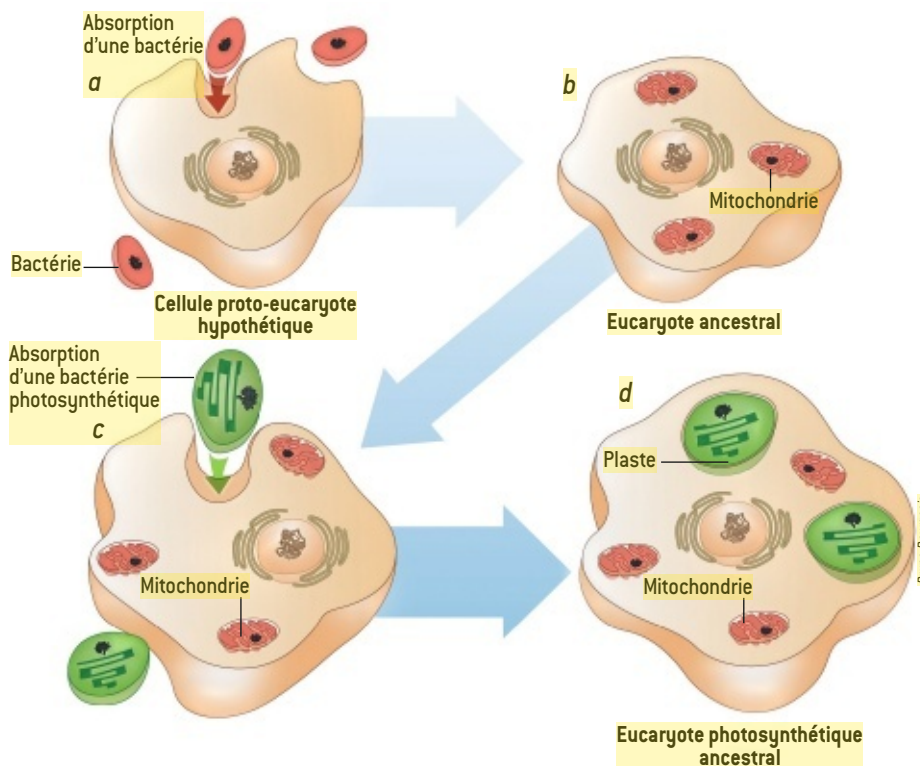
L'AUTEUR



Marc-André SELOSSE, professeur de biologie à l'Université Montpellier II, est chercheur au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) du CNRS.

L'ESSENTIEL

- ✓ La théorie darwinienne classique illustre l'évolution des espèces par un arbre dont les branches ne se rejoignent jamais.
- ✓ Or des phénomènes de fusion évolutive se produisent dans le monde du vivant.
- ✓ Les fusions évolutives sont de trois types : l'endosymbiose, l'hybridation et le transfert de gènes.
- ✓ Plus qu'un arbre qui se ramifie, l'évolution s'apparente à un réseau complexe de lignées échangeant des gènes.



2. DES CELLULES EUCARYOTES

ont un jour absorbé des bactéries (a) qui ont formé des mitochondries, donnant l'ancêtre des eucaryotes actuels (b). L'absorption de bactéries photosynthétiques (c) a produit l'ancêtre des végétaux actuels (d). Les endosymbiotes jouent un rôle dans le métabolisme des cellules. Par exemple, des bactéries *Buchnera* (e, les petits cercles) nichées dans une cellule de puceron du pois fournissent à l'insecte des acides aminés.

bénéfique avec leur hôte; elles seraient transmises de génération en génération. Cette théorie relative à la symbiose intracellulaire, dite endosymbiotique, est aujourd'hui largement acceptée.

Elle explique par exemple l'origine des mitochondries, les organites qui fournissent l'énergie nécessaire à la vie en assurant la respiration cellulaire: les mitochondries sont des bactéries qui à un moment de l'évolution se sont intégrées dans une cellule et y ont non seulement survécu, mais ont établi des liens avec la cellule colonisée (voir la figure 2). Tous les organismes eucaryotes, des végétaux aux animaux en passant par les champignons et divers unicellulaires, contiennent des mitochondries. Le petit génome contenu dans ces organites est proche de celui de bactéries parasitant les cellules, par exemple *Rickettsia*, l'agent du typhus.

Ainsi, les mitochondries sont des bactéries endosymbiotiques qui sont devenues

des organites intracellulaires utilisant l'oxygène pour produire de l'énergie. Même dans des milieux dépourvus d'oxygène, divers eucaryotes qui ne respirent pas contiennent encore des mitochondries modifiées participant au métabolisme, c'est-à-dire produisant de l'énergie, ou assurant la synthèse de molécules indispensables aux cellules.

L'endosymbiose, une source de diversité

Les eucaryotes actuels descendent donc d'une chimère ancestrale formée d'une cellule hôte et d'une protomitochondrie, qui a ensuite évolué différemment selon les lignées. De même, l'analyse du génome des plastides qui assurent la photosynthèse dans les plantes et les algues, ceux-là même qu'avait étudiés Schimper il y a 150 ans, a

confirmé que les plastides résultent de symbioses qui se sont produites plusieurs fois dans l'évolution. Dans les plantes vertes ou les algues vertes et rouges, par exemple, ils dérivent de bactéries photosynthétiques du groupe des cyanobactéries.

Il existe beaucoup d'autres exemples d'endosymbioses plus récentes: les cellules de nombreux eucaryotes contiennent des bactéries, parfois de plusieurs espèces, qui sont transmises lors des divisions cellulaires. C'est le cas pour la majorité des protozoaires et des insectes (voir la figure 2). Comme les mitochondries, ces endosymbioses assurent souvent des fonctions importantes, qui ont été sélectionnées au cours de l'évolution.

Par exemple, l'équipe de Nancy Moran, de l'Université d'Arizona, a montré que des bactéries facilitent la colonisation de certaines niches écologiques par des insectes en leur apportant des éléments nutritifs indispensables. La cicadelle *Homalodisca coagulata* se nourrit de sève dépourvue d'une dizaine d'acides aminés essentiels aux insectes: elle contient deux bactéries, *Sulcia muelleri* qui synthétise huit de ces acides aminés, et *Baumannia cicadellinicola*, qui en produit deux autres. De même, la mouche tsé-tsé (*Glossina palpalis*) survit grâce à la bactérie *Wigglesworthia glossinidia*, qui synthétise une vitamine B absente du sang dont elle se nourrit. Citons enfin les pucerons qui parasitent le trèfle et deviennent incapables de se nourrir de cette plante quand on élimine expérimentalement leurs bactéries endosymbiotiques.

Les bactéries endosymbiotiques des insectes ont des génomes très réduits. Elles ont perdu les gènes nécessaires à une vie autonome: seuls persistent donc les chimères issues de la fusion de la bactérie et de l'insecte. Ces fusions endosymbiotiques ont contribué à l'extraordinaire diversification des insectes, dans des niches écologiques très diverses.

Outre la fusion de génomes d'origines différentes par endosymbiose, un autre mécanisme de l'évolution par fusion est l'hybridation, qui croise deux espèces. Ce processus repose sur la fusion de cellules sexuelles et donc de matériels génétiques issus de deux espèces différentes. Contrairement à une idée reçue, elle n'est pas propre aux végétaux, mais elle est également à l'œuvre chez les micro-organismes et les animaux.

Dans le monde végétal, l'hybridation revêt deux formes: au sens strict, le des-