

forme d'évolution par fusion assemble des gènes d'origines très différentes : le transfert de gènes. On sait que des transferts de gènes se produisent dans les bactéries de trois façons différentes. Ou bien les gènes circulent d'une bactérie à l'autre par des ponts cellulaires : c'est la conjugaison. Ou bien un virus infecte la bactérie et y introduit des gènes : c'est la transduction. Enfin, il peut exister dans l'environnement, des fragments d'ADN libre qu'une bactérie peut acquérir : c'est la transformation. Souvent, les gènes transférés sont repérables car on les trouve dans des lignées éloignées, mais pas dans les lignées proches.

Transferts de gènes à double sens

Ainsi, si l'on compare les génomes du colibacille (*Escherichia coli*) et de la lignée voisine des *Salmonella*, avec laquelle il partage un ancêtre commun datant de 100 millions d'années, on constate que près de 750 gènes issus d'espèces plus éloignées ont été acquis par le colibacille, soit 18 pour cent de son génome actuel.

Les transferts peuvent se produire entre organismes très éloignés dans l'arbre évolutif. Les bactéries *Chlamydia*, parasites des animaux et des plantes, ont acquis des gènes d'eucaryotes permettant la synthèse des stéroïdes, des lipides tel le cholestérol, que les bactéries ne produisent normalement pas. Pour qu'un transfert de gènes se produise, il suffit que les partenaires coexistent dans un même milieu, quel que soit leur degré de parenté. Ainsi, les fusions par transfert de gènes sont fréquentes chez les bactéries.

On a récemment découvert, grâce au séquençage des génomes de plusieurs eucaryotes, que ces organismes subissent aussi de tels transferts de gènes. Ainsi, les vers nématodes parasites des plantes, tels *Meloidogyne hapla* et *Meloidogyne incognita*, ont acquis des gènes d'enzymes bactériennes détruisant la paroi végétale, ce qui leur permet d'attaquer les plantes. De même, le champignon *Pyrenophora tritici-repentis* est devenu un parasite du blé dans les années 1940 : cette espèce, initialement bénigne, a alors reçu d'un autre champignon parasite du blé un gène codant une toxine affaiblissant l'hôte. À l'évidence, ces transferts de gènes sont au cœur de l'adaptation des organismes à leurs niches écologiques.

Plus surprenant encore, des gastéropodes marins, les Élysides, absorbent des plastides d'algues et les intègrent pour quelque temps dans leurs propres cellules (voir la figure 3). Les plastides fonctionnent alors au bénéfice de l'animal, qui utilise les sucres formés. *Elysia chlorotica* consomme par exemple une algue annuelle éphémère, dont elle conserve les plastides pendant... dix mois. Or le plaste porte un génome si réduit que la plupart de ses protéines sont produites à partir des gènes du noyau de l'algue. Le noyau des Élysides a acquis certains de ces gènes, comme ceux des protéines synthétisant la chlorophylle. Ces chimères sont les seuls animaux à fabriquer de la chlorophylle : elles se transforment en végétaux « transitoires » entre deux prises alimentaires.

Contrairement aux processus à l'œuvre chez les bactéries, les mécanismes des transferts de gènes chez les eucaryotes restent mal compris. Il s'agit vraisemblablement d'événements accidentels. L'incorporation d'ADN issu de la digestion d'aliments est sans doute fréquente chez les unicellulaires, telles les amibes, qui se nourrissent en digérant d'autres cellules. Les virus, quand ils changent d'espèce hôte, sont aussi de possibles vecteurs de gènes.

En revanche, les transferts sont peu fréquents chez les animaux, car les cellules sexuelles, seules à transmettre les gènes, sont à l'abri de l'environnement et ne reçoivent quasiment pas de gènes. Seuls certains virus sont capables de les atteindre, et d'y introduire leur génome : les rétrovirus aujourd'hui intégrés dans le génome humain représentent près de dix pour cent des gènes de l'homme.

Des chimères au cœur des cellules

Par ailleurs, on sait que de nombreux gènes issus de plastides et de mitochondries se sont intégrés dans le génome du noyau cellulaire des eucaryotes. Là, ils permettent non seulement la synthèse de protéines intervenant dans les plastides ou les mitochondries, mais aussi de protéines ayant de nouvelles fonctions dans la cellule.

Par exemple, 2000 des 25000 gènes de l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), une plante proche de la moutarde servant de modèle aux biologistes, seraient issus de ses plastides. Ainsi en est-il des gènes codant les phytochromes, protéines sensibles à la lumière qui régulent le développement de

Glossaire

✓ FUSION

Terme proposé pour réunir l'ensemble des mécanismes évolutifs qui regroupent dans une même lignée des gènes issus de lignées différentes : endosymbiose, hybridation et transfert de gènes.

✓ ENDOSYMBIOSE

Symbiose où l'un des partenaires vit dans les cellules de l'autre. Si elle peut être transmise à la génération suivante, c'est une fusion évolutive.

✓ HYBRIDATION

Résultat de la fécondation entre gamètes issus de lignées différentes. L'hybride formé peut être viable ou non. S'il est fertile, il peut constituer une espèce nouvelle.

✓ ALLOPOLYPOÏDIE

Hybridation où l'organisme contient non pas un jeu de chromosomes de chaque parent, mais deux. Les organismes qui en sont issus constituent une espèce nouvelle, car ils ne se croisent plus avec l'espèce des parents.

✓ TRANSFERT DE GÈNE

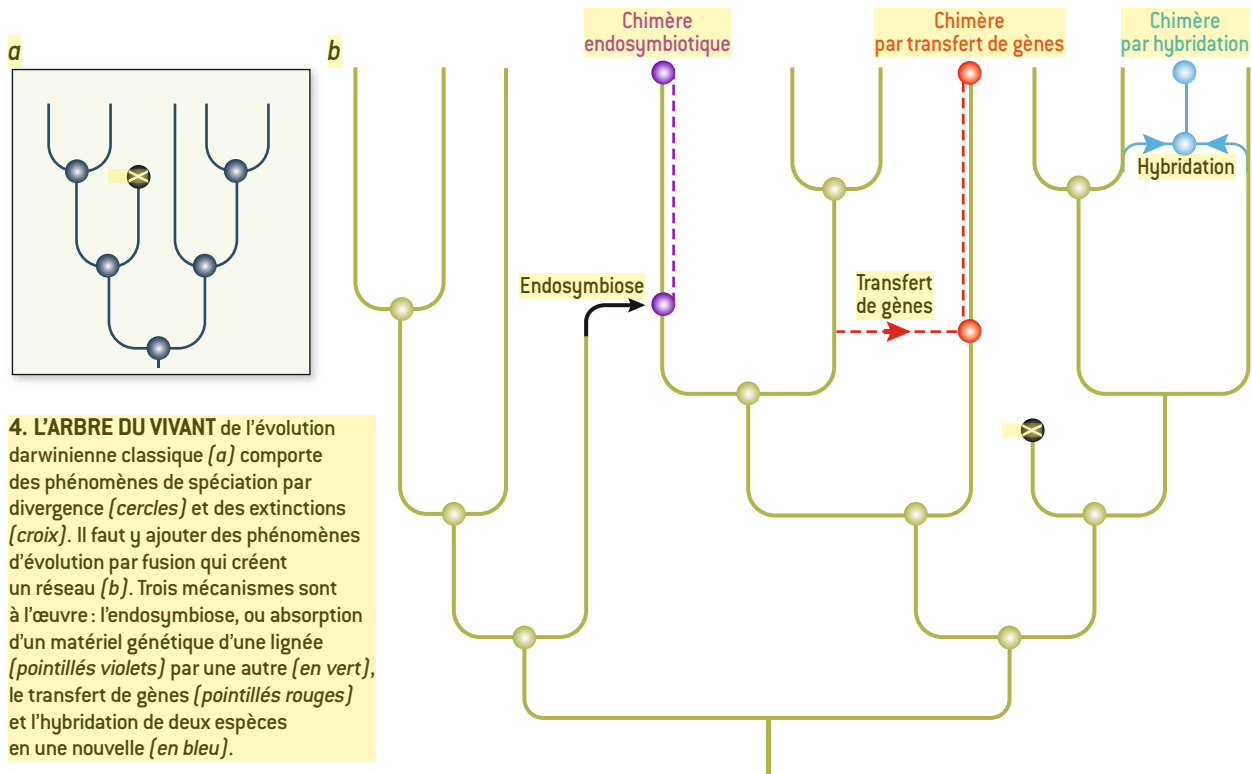
Passage d'un gène d'un organisme à un autre, d'espèce différente. Mécanisme fréquent chez les bactéries, il existe aussi chez les organismes plus complexes.

✓ SUR LE WEB

<http://sbe.umaine.edu/symbio/index.html>

<http://www.sb-roscoff.fr/ETSymbioses2008>

http://www.cefe.cnrs.fr/coev/MA_Selosse.htm



la plante et l'expression de divers gènes. C'est aussi le cas du gène codant les protéines nécessaires à la synthèse de la cellulose des plantes : ce polymère de la paroi cellulaire a été acquis à partir de la paroi des bactéries ancêtres des plastes.

Plusieurs équipes ont cherché à quantifier la fréquence des transferts d'ADN des organites (mitochondries et plastes) vers le noyau. Pour ce faire, on place un gène de résistance à un antibiotique dans l'ADN de l'organite : ce gène s'exprime seulement dans le noyau cellulaire, car la machinerie génétique de l'organite, un peu différente, ne peut le transcrire. Si toutefois des cellules de la descendance deviennent résistantes à l'antibiotique, c'est que ce gène a été transféré dans le noyau. Par conséquent, la fréquence d'apparition de cellules résistantes représente la fréquence du transfert.

Elle serait de l'ordre de une à dix par million à chaque génération ! Si l'on tient compte des effectifs des populations naturelles, l'ADN d'organites s'intègre fréquemment dans le noyau. De nombreux fragments sont vite perdus, mais d'autres peuvent remplir une fonction, si, par le biais de mutations, ils acquièrent la capacité de s'exprimer dans le noyau.

Ainsi, trois phénomènes de fusion contribuent à l'évolution des espèces,

voire à l'apparition de nouvelles espèces. Ces processus représentent autant de petits sauts évolutifs qui réunissent des gènes issus d'histoires évolutives indépendantes en une chimère. Ce phénomène, nommé saltationnisme, nuance l'approche continue de l'évolution soutenue par Darwin, pour qui l'évolution ne fait pas de sauts.

Quand la théorie de l'évolution évolue

Cette notion d'évolution par fusion fait donc évoluer le darwinisme, tant quant au mécanisme d'apparition des espèces, qu'en ce qui concerne le rythme de l'évolution. En outre, il réintroduit une forme d'hérédité des caractères acquis, car une bactérie ou des gènes acquis par l'un des mécanismes fusionnels persistent dans la descendance.

Plus qu'un arbre, le cours de l'évolution serait un réseau, dont les branches se séparent, puis refusionnent (voir la figure 4). Darwin avait puisé son inspiration dans les arbres généalogiques ; or, si on les regarde de près, ce sont aussi des réseaux. Chaque naissance unit deux lignées à travers leur descendance. Certains chercheurs tentent de dessiner les

anastomoses évolutives. Ainsi, Maria Rivera et James Lake, de l'Université de Californie, ont représenté les relations entre les grands groupes du vivant sous la forme de ce qu'ils ont nommé un anneau de la vie, où les premières cellules eucaryotes résultent de la fusion d'une bactérie et d'une archée (les archées forment avec les bactéries et les eucaryotes l'ensemble des organismes vivants).

En 1970, L. Margulis écrivait que le travail de Darwin était « anthropomorphique et d'un intérêt limité », critiquant ainsi l'absence de l'endosymbiose dans la vision darwinienne de l'évolution. Souvent, les approches néodarwiniennes prennent trop peu en compte l'importance des fusions. En réalité, évolution par fusion et évolution par divergence ne s'excluent pas : chacune est un mécanisme d'innovation biologique, créant une diversité sur laquelle agit la sélection naturelle. En ce sens, les arbres évolutifs « classiques » restent valables, mais ne reflètent qu'une partie de la réalité. La conception de l'évolution biologique vers laquelle nous pensons qu'il faudrait tendre enrichit le schéma classique de spéciation par les phénomènes de fusion évolutive. Loin de se figer en un dogme, la théorie néodarwinienne de l'évolution continue à évoluer...

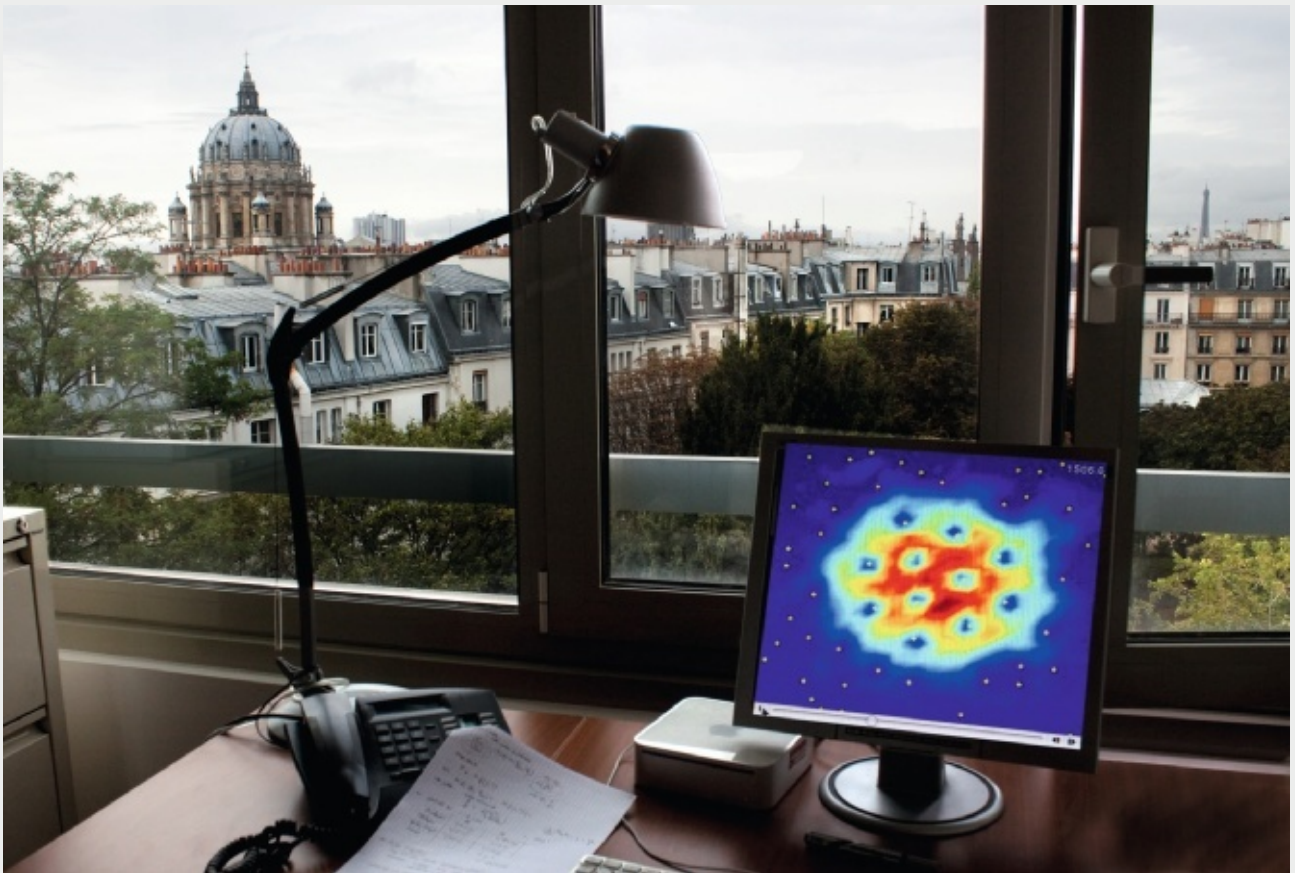


Institut Francilien
de Recherche
sur les Atomes Froids

L'exploration des richesses du monde quantique

« Par la mise en réseau de ses équipes de recherche, l'IFRAF contribue à enrichir la vision moderne du monde quantique et à mieux maîtriser les technologies du temps et de l'espace »

Michèle Leduc, directrice de l'IFRAF



Les petits nuages d'atomes ultrafroids en tournant sur eux-mêmes engendrent des tourbillons quantiques qui inspirent les théoriciens de l'IFRAF.