

CH2 – LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES : TRANSFERTS HORIZONTAUX ET SYMBIOSES

Les individus d'une même espèce sont produits, de génération en génération, par la **méiose** et la **fécondation (reproduction sexuée)** qui assure à la fois la diversification du génome mais en même temps la conservation du génome et du caryotype et donc la stabilité de l'espèce. Ces processus permettent des **transferts verticaux de gènes** (vers les descendants). Néanmoins, au cours de l'évolution, les génomes subissent des transformations plus profondes qui génèrent de la diversité et qui aboutissent parfois à la création de nouvelles espèces. C'est le cas lors de **transferts de gènes horizontaux** : ce sont des transferts qui se font entre 2 espèces bien différentes et qui impliquent souvent des micro-organismes (virus, bactéries). Dans d'autres cas, les génomes sont encore plus fortement intriqués, il s'agit de phénomènes d'**endosymbiose**.

Il existe ainsi d'autres mécanismes, d'origine génétique ou non, qui permettent de créer une grande **diversité d'espèces**, mais aussi d'augmenter la **variabilité** au sein de celles-ci.

Comment les génomes se sont-ils complexifiés au cours de l'évolution et comment aboutissent-ils à la formation de nouvelles espèces ?

I – L'apport partiel d'un nouveau génome : les transferts horizontaux de gènes

A. Découverte des transferts de gènes chez les bactéries

La découverte des transferts de gènes a été réalisée par Griffith et McLeod au début du XXème siècle. En effet, ils ont étudié des bactéries (pneumocoques) de 2 types : les S qui sont pathogènes et les R qui ne le sont pas. Or, lorsqu'ils ont mis en présence des bactéries S détruites par chauffage avec des bactéries R vivantes, ils ont constaté que les bactéries S devenaient virulentes et tuaient les souris.

Au milieu du XXème siècle (1944), McLeod et Avery démontrent que cette capacité d'acquisition de la virulence dépend de l'ADN. Pour cela, ils traitent les bactéries avec des enzymes qui dégradent l'ADN, l'ARN ou les protéines.

B. Des mécanismes variés de transferts

B.1. La transformation bactérienne

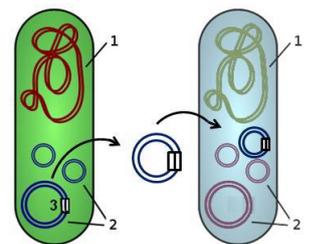
L'explication complète :

Les **bactéries S** synthétisent une **capsule**, une épaisse enveloppe de polysaccharides qui entoure la paroi. Cette capsule peut protéger la bactérie contre le système immunitaire de l'organisme qu'elle envahit, ce qui augmente leur virulence. Les **bactéries R** sont des mutants dépourvus d'une enzyme essentielle à la synthèse de cette capsule.

Les **bactéries S ont transmis aux R le gène codant l'enzyme** qui leur manquait. Ainsi, les R pouvant maintenant fabriquer l'enzyme ont pu synthétiser la capsule. Elles sont devenues des bactéries « S » (= des R transformées).

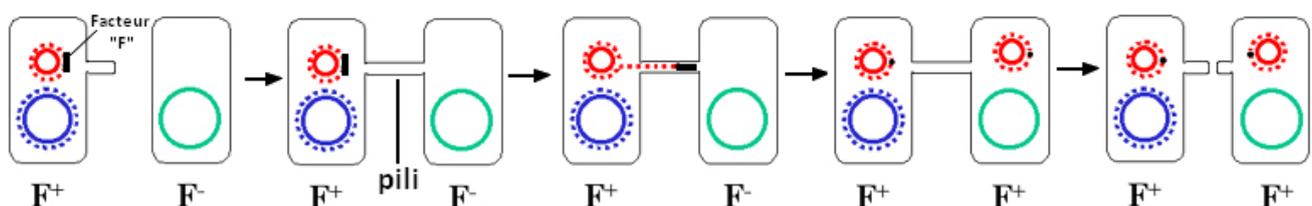
Le mécanisme :

Une bactérie « donneuse » a la capacité de libérer ses gènes dans l'environnement de manière **libre** ou par l'intermédiaire de **plasmides** (mini-chromosomes circulaires [2.]). Les plasmides sont ensuite transférés et intégrés au génome de la bactérie « receveuse » qui acquiert ainsi une nouvelle fonction. (1. Chromosome bactérien – 2. Plasmides). **Un gène peut donc être transmis d'un organisme à un autre sans lien avec la reproduction** (c'est l'hérédité cytoplasmique)



B.2. La conjugaison bactérienne

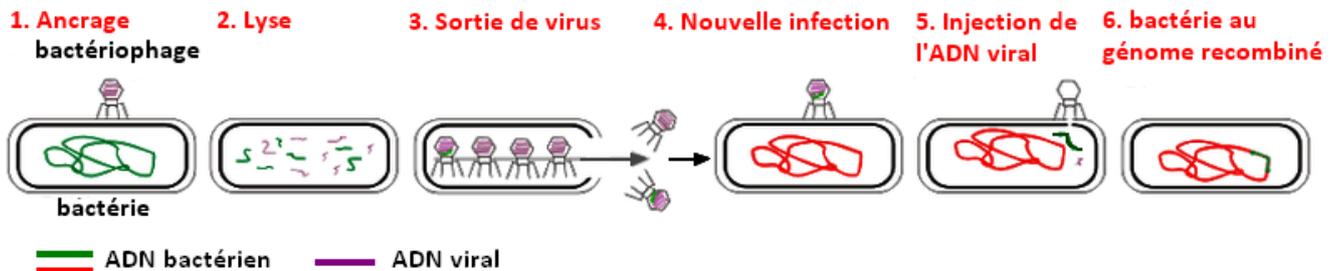
Il s'agit du transfert d'ADN d'une bactérie « donneuse » à une bactérie « receveuse » par contact direct entre les cellules (pili = ponts cytoplasmiques). La direction de transfert du matériel génétique est unidirectionnelle. La capacité d'une bactérie à être un donneur est la conséquence de la présence dans la cellule d'une séquence d'ADN portée par un plasmide, appelé **facteur F** ou facteur de fertilité (ou facteur sexuel). Le facteur F porte des gènes qui sont nécessaires à sa réplication et pour sa capacité à transférer de l'ADN au receveur.



B.3. La transduction

Est un processus qui consiste en un transfert d'ADN d'une bactérie « donneuse » à une bactérie « receveuse », par l'intermédiaire d'un vecteur viral appelé **bactériophage**.

Le bactériophage infecte une première bactérie « donneuse » et y injecte son ADN viral (1.). Les bactériophages découpent le génome de leur hôte par des enzymes (2.). La transduction résulte alors de l'emballage accidentel de fragments d'ADN de la bactérie « donneuse » dans la capsid des bactériophages qui se multiplient dans la cellule-hôte (3.). Lors de la libération des phages, ceux-ci vont infecter d'autres bactéries (5.). Les virus comportant une partie d'ADN bactérien vont l'injecter dans une nouvelle bactérie receveuse. Celle-ci a maintenant un **génomme recombiné**, elle peut exprimer un nouveau caractère (une nouvelle fonction). Par exemple, si un **gène de résistance à un antibiotique** a été transmis, la nouvelle bactérie acquerra également cette résistance.



Bilan: Lorsqu'un échange de gène se fait entre 2 êtres vivants d'espèces différentes, on parle de **transfert horizontal de gènes**. L'ADN étant universel, l'ADN reçu peut conduire à l'acquisition de nouveaux caractères qui si ils sont avantageux conduisent à la sélection de l'individu modifié.

Ces événements sont assez fréquents et sont accumulés au cours de l'évolution (temps important). Ainsi, on estime que le génome humain contient entre 5 et 8% de gènes d'origine virale.

Les transferts de gènes sont possibles entre de nombreux êtres vivants :

- Les bactéries échangent du matériel génétique entre elles (conjugaison).
- Certaines bactéries peuvent transférer du matériel génétique vers les plantes (ex : *Agrobacterium*, une bactérie du sol. Elle est utilisée en laboratoire pour produire des OGM).
- Les virus (bactériophages) infectent les bactéries en leur transférant leur ADN
- Les rétrovirus (VIH, MPMV ...) introduisent leur matériel génétique (rétro-transcription puis intégration dans le génome).

Le gène de syncytine 1 est issu d'un transfert de gène depuis le virus MPMV

C. Les transferts horizontaux sont fréquents dans l'arbre du vivant

Pour reconstituer les transferts de gènes au cours de l'évolution, on réalise le séquençage de divers génomes et/ou la recherche par PCR de gènes connus (évite de séquencer tout le génome). Dans ce cas, on constate que le gène présente une très forte ressemblance entre des individus assez différents (ex : 98% de ressemblance entre le gène de syncytine 1 humaine et celle du virus). Cette très forte ressemblance est le signe que ce gène provient d'un transfert horizontal (quasi instantané à l'échelle de l'évolution). Du fait de **l'universalité de l'ADN**, ces transferts horizontaux sont possibles entre organismes même très éloignés phylogénétiquement. En effet, il existe de nombreux indices montrant ces transferts horizontaux dans d'autres groupes d'êtres vivants que les bactéries, notamment chez les animaux.

De plus, avec les séquences obtenues, on peut comparer les séquences (ADN ou protéine) pour réaliser **un arbre phylogénétique**

Celui-ci permet donc de :

- Placer l'événement de transfert de gène en fonction des espèces qui possèdent ce gène et celles qui ne le possèdent pas.
- Retracer les modifications qui ont affecté ce gène transféré au cours de l'évolution .

Si ces caractères hérités ont été conservés au cours de l'évolution c'est qu'ils offraient un **avantage sélectif** chez les organismes receveurs.

Les transferts horizontaux sont une source de diversification des êtres vivants et un des moteurs de l'évolution des espèces

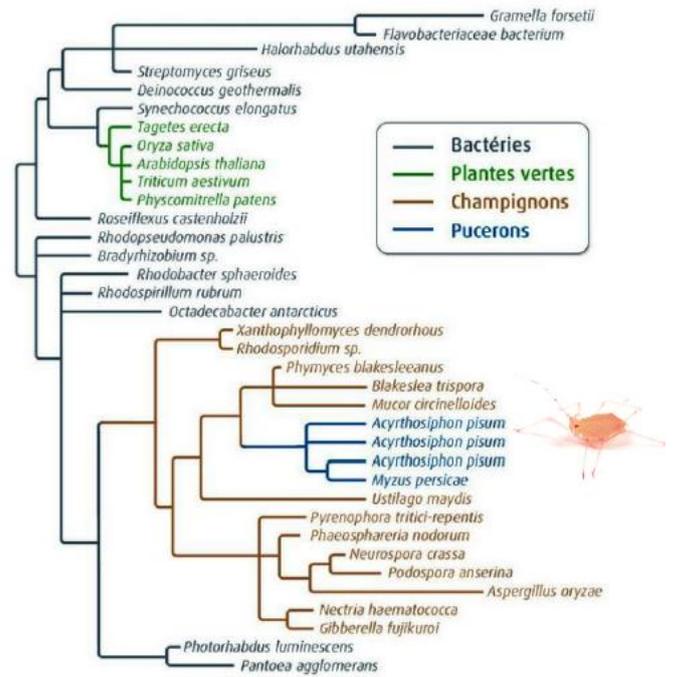
Chez l'Homme : Les chercheurs ont trouvé au minimum **33 gènes acquis par transfert horizontal**. Mais potentiellement... **145 !**

Polymorphisme de couleur chez les Pucerons

Chez le puceron *Acyrtosiphon pisum*, certains individus sont **verts**, d'autres sont **roses**. Cette dernière couleur est due à la présence de **pigments caroténoïdes** dans les tissus.

Les animaux ne synthétisent habituellement pas ces molécules.

Deux enzymes inhabituelles chez les animaux (caroténoïde désaturase et caroténoïde synthase) sont responsables chez les pucerons de la synthèse des caroténoïdes. Les gènes codant ces enzymes ont été séquencés et leur séquence a été comparée avec des enzymes similaires dans d'autres groupes d'êtres vivants (par ex. chez certains **champignons** - voir ci-contre) Cette comparaison a permis d'établir des **arbres phylogénétiques**. Celui de la caroténoïde synthase est figuré ci-contre. (Celui de la caroténoïde désaturase montre des résultats identiques). On a remarqué que les formes « roses » sont moins victimes de prédation par les coccinelles.



D. Transferts horizontaux de gènes et santé humaine

- Des effets préoccupants : Notre environnement proche est occupé par de multiples microorganismes. Au sein des populations bactériennes, les transferts par conjugaison par le biais des plasmides constituent le principal mécanisme de la **propagation rapide de gènes de virulence** et de **gènes de résistance aux antibiotiques**. Leur fréquence pose de graves problèmes de santé, en particulier dans les hôpitaux, avec l'apparition de **souches bactériennes multirésistantes aux antibiotiques** = c'est l'**antibiorésistance** (Cf. *maladies nosocomiales = maladies liées aux soins hospitaliers - Le ministère de la Santé estime que les infections nosocomiales sont responsables de 4 000 décès chaque année en France*).

- Mais des applications biotechnologiques effectives ou prometteuses :

La production de molécules thérapeutiques : l'exemple de l'**insuline**. Autrefois extrait de pancréas de porcs, l'insuline, une **hormone hypoglycémisante** est depuis 1982 produite par génie génétique. Le gène de l'insuline humaine, isolé et cloné a été intégré à des plasmides bactériens. Ces plasmides recombinants ont été introduits dans une **souche bactérienne** (*Escherichia coli*). Les bactéries modifiées génétiquement sont cultivées dans des bioréacteurs où elles se multiplient activement et produisent de grande quantité de protéines qui après extraction et purification sont conditionnées pour leur utilisation dans le traitement du **diabète**.

D'autres procédés utilisent des **levures** (*Saccharomyces cerevisiae*) chez lesquelles sont introduits des plasmides recombinés.

II- Les endosymbioses, une diversification par fusion d'organismes

A. L'origine des chloroplastes et mitochondries

Les **cellules eucaryotes** se caractérisent par la présence, dans leur cytoplasme, de compartiments délimités par des membranes. On parle d'organites (noyau, réticulum, appareil de Golgi, lysosomes, mitochondries, chloroplastes). Les **mitochondries** et les **chloroplastes** ont en plus la particularité de contenir un **génome**.

Les **mitochondries** (présents chez tous les eucaryotes) et **chloroplastes** (uniquement présents chez les eucaryotes photosynthétiques) qui sont transmis d'une génération cellulaire à l'autre présentent des caractéristiques rappelant celles des **bactéries**. L'observation des chloroplastes et des mitochondries dans les cellules montre des éléments spécifiques qui ont permis d'envisager leur origine bactérienne :

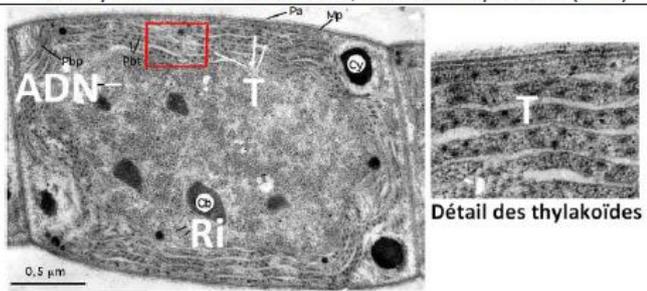
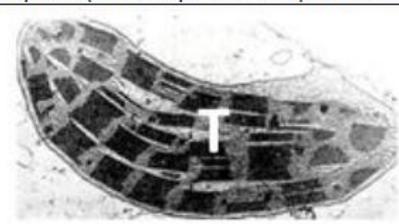
- La **taille des organites** (1 à 5 µm, semblable à des bactéries)
- La **présence de 2 membranes**, l'interne fine (6 nm, ce qui est semblable aux membranes des procaryotes) et l'externe plus épaisse (7,5 nm, semblable aux eucaryotes)
- La présence de **lipides spécifiques** dans la membrane interne, typique des bactéries
- Leurs **processus de division se fait par « étranglement »** (scissiparité), ce qui est le cas chez les procaryotes.
- La **présence d'ADN spécifique** des chloroplastes et mitochondrie qui sont transcrits et traduits : on parle alors d'organites semi-autonomes.

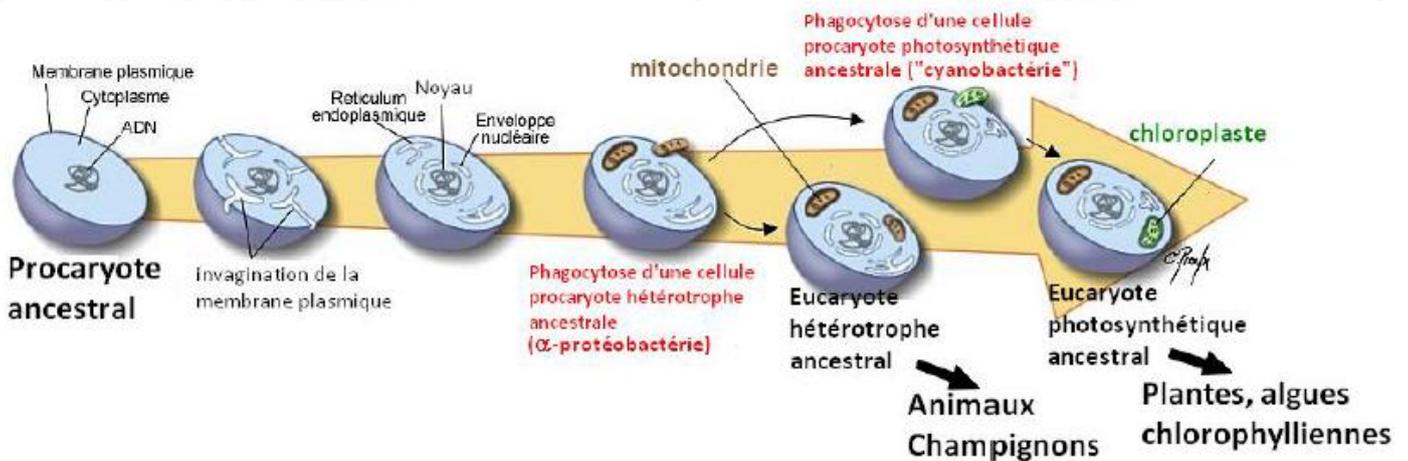
Toutes ces observations permettent de penser que les chloroplastes et mitochondries proviennent de l'intégration de microorganismes comme les cyanobactéries (pour le chloroplaste) et les Protéobactéries alpha (pour la mitochondrie). On parle d'**endosymbiose*** : chaque partenaire tire un bénéfice (production d'énergie pour la cellule, protection pour l'organite).

*Définition : **interaction à bénéfices réciproques entre deux cellules, l'une étant située à l'intérieur de l'autre.**

On considère qu'un organisme symbiotique intracellulaire (= un **endosymbiote**) devient un organite lorsqu'il perd son autonomie génétique, c'est-à-dire qu'il est incapable de vivre sans la cellule qui l'abrite.

En effet, Le génome des cellules incorporées régresse au cours des générations et certains de leurs gènes sont transférés à l'ADN du noyau de la cellule hôte. Toutefois, certains caractères peuvent être transmis par l'ADN de ces organites : on parle d'**hérédité cytoplasmique**

<p>Une Cyanobactérie filamenteuse, <i>Oscillatoria splendida</i> (MET)</p>  <p>Détail des thylakoïdes</p>	<p>Un chloroplaste (microscope électronique à transmission)</p>  <p>Les thylakoïdes (T) sont des membranes internes contenant des pigments photosynthétiques – Ri : ribosomes.</p>
<p>Génome d'une Cyanobactérie du genre <i>Nostoc</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 6 413.10³ paires de nucléotides - 5 368 gènes codant pour des protéines 	<p>Génome des chloroplastes du Maïs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 140.10³ paires de nucléotides - 76 gènes codant pour des protéines

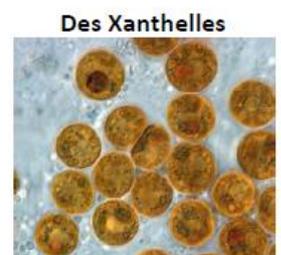
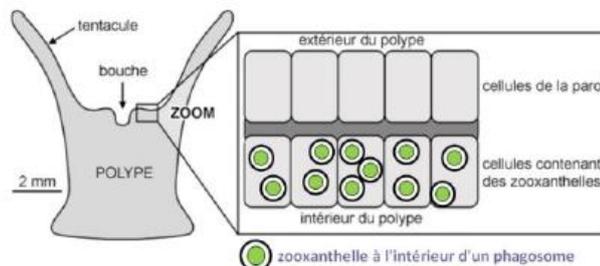
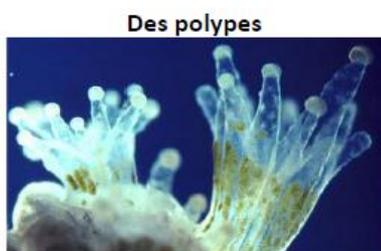


B. L'endosymbiose est un moteur de l'évolution du vivant

Les premières **cellules eucaryotes** seraient apparues il y a environ 2 milliards d'années et se seraient ensuite diversifiées. Plusieurs événements d'endosymbiose sont survenus au cours de l'évolution du vivant. À chaque fois, une cellule a été englobée par une autre, on parle d'**endosymbiose primaire, secondaire, tertiaire...** La nouvelle cellule créée contient des éléments, plus ou moins simplifiés, des deux cellules de départ mais elle acquiert de nouvelles potentialités métaboliques que ce soit dans le **métabolisme énergétique** avec les mitochondries (Cf. *La respiration mitochondriale*) ou la réalisation de la **photosynthèse** (Cf. THÈME 3 du programme de T SPÉ)

Pour information : Les eucaryotes animaux et végétaux ne représentent qu'une infime fraction de la diversité des formes cellulaires chez les eucaryotes. L'essentiel de cette diversité réside en réalité dans différents organismes, souvent unicellulaires, les **protistes**

GRAND ORAL : D'autres cas d'endosymbiose : Les coraux photosynthétiques



Les **coraux** constructeurs de récifs sont des **animaux** appartenant au groupe des **Cnidaires** qui vivent en colonies de **polypes** et se nourrissent de plancton. Ils sécrètent un « squelette » externe calcaire.

Les **Xanthelles** sont des algues unicellulaires photosynthétiques que l'on retrouve dans certaines cellules du polype, à l'intérieur de phagosomes : il s'agit d'une **endosymbiose**, les 2 partenaires en tirent un bénéfice réciproque