

TD : Les endosymbioses et leurs conséquences évolutives

La symbiose est définie comme une association durable, à bénéfices réciproques, entre deux êtres vivants appelés symbiotes. Lorsque l'un des partenaires vit à l'intérieur des tissus ou des cellules de l'autre partenaire, l'association est alors appelée endosymbiose.

Nous cherchons à étudier un cas actuel d'endosymbiose et à montrer l'importance de ce type d'association dans l'évolution des êtres vivants.

1. Les pucerons du pois et leurs bactéries symbiotiques (d'après TermSpé, Bordas, 2020)

Les pucerons sont des insectes parasites des plantes, qui se nourrissent en insérant leur rostre (pièce buccale) dans les tissus conducteurs de la sève élaborée*.

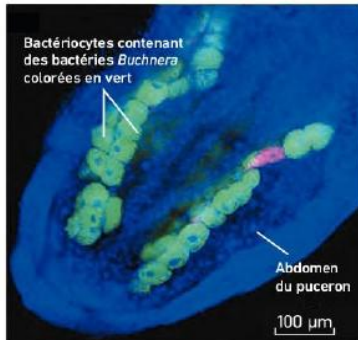
Les pucerons doivent ingérer quotidiennement cent fois leur poids de sève pour se procurer les nutriments dont ils ont besoin. Ils rejettent alors par leur anus un miellat sucré. Il leur manque cependant une dizaine d'acides aminés essentiels, qu'ils ne sont pas capables de synthétiser, et qui sont souvent absents de la sève élaborée (B).

Composition	Sève élaborée
Glucides (surtout saccharose)	100 à 300 g·L ⁻¹
Acides aminés (surtout Glu, Asp, Gln, Asn)	5 à 40 g·L ⁻¹
Protéines	1,45 à 2,20 g·L ⁻¹
Ions minéraux	1 à 5 g·L ⁻¹



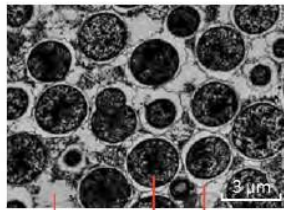
A Puceron du pois se nourrissant.

B Composition de la sève élaborée.



C Abdomen de puceron (microscopie optique en fluorescence : en vert, *Buchnera aphidicola*) et détail de l'intérieur d'un bactériocyte (MET*).

Près de leur tube digestif et des ovaires, les pucerons du pois possèdent des cellules géantes, les bactériocytes, contenant environ 10 millions de bactéries *Buchnera aphidicola*. Chaque bactérie est contenue dans une vésicule de la cellule hôte, appelée symbiosome (C).



cytoplasme du bactériocyte, *Buchnera*, symbiosome

Buchnera ne peut vivre et se reproduire sans son hôte, qui lui procure protection et nutriments. Son génome d'environ 900 gènes est réduit et dégénéré, comparativement à celui d'une bactérie proche, *E. coli* (5 000 gènes). *Buchnera* a perdu par exemple des gènes impliqués dans la formation de la paroi bactérienne, dans la perception du milieu et la résistance aux agents stressants*. Mais il a conservé des gènes permettant la synthèse d'acides aminés essentiels et de vitamines.

La relation symbiotique de *Buchnera aphidicola* aux pucerons aurait débuté il y a 250 à 150 millions d'années. La transmission de ces bactéries se fait de façon verticale, du puceron femelle vers ses œufs ou embryons.

Expériences	Résultats
Pucerons en symbiose avec <i>Buchnera</i> , élevés sur un milieu dépourvu des dix acides aminés essentiels.	Les pucerons se développent et se reproduisent.
Traitement antibiotique tuant les bactéries <i>Buchnera</i> .	Les pucerons se développent mal et deviennent stériles.
Pucerons traités par l'antibiotique et auxquels on fournit une alimentation contenant les dix acides aminés essentiels.	Régression des symptômes.
Pucerons symbiotiques élevés dans un milieu enrichi en soufre et en azote marqués.	Des acides aminés marqués apparaissent au sein des bactéries, puis sont identifiés chez les pucerons.

D Étude expérimentale.

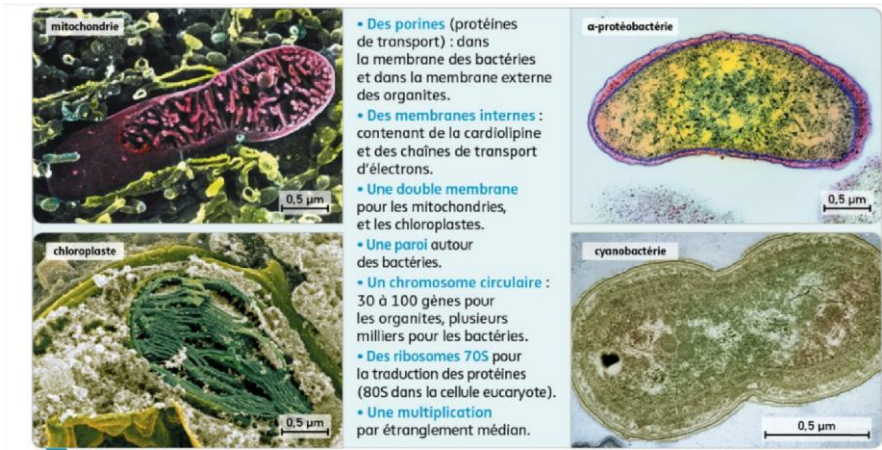
- Justifiez le terme d'endosymbiose utilisé pour décrire cet exemple :
- Précisez les bénéfices réciproques que procure cette association à chacun des deux partenaires :
- Relevez les modifications générées par cette association sur les bactéries symbiotiques :

- Justifiez le terme d'endosymbiose utilisé pour décrire cet exemple :** C'est une endosymbiose car ici les bactéries *Buchnera aphidicola* vivent dans des vésicules (symbiosomes) situées à l'intérieur de cellules des pucerons (cellules appelées bactériocytes – doc C).
- Précisez les bénéfices réciproques que procure cette association à chacun des deux partenaires :** Dans cette association, les bactéries bénéficient d'une protection et de nutriments assurés par les pucerons et les pucerons bénéficient d'un apport en acides aminés produits et transmis par les bactéries symbiotiques.
- Relevez les modifications générées par cette association sur les bactéries symbiotiques :** Nous observons que le génome des bactéries symbiotiques s'est fortement réduit (il est passé de 5000 gènes chez une bactérie proche mais libre, à 900 gènes chez *Buchnera aphidicola*). Certains des gènes disparus concernent des caractéristiques devenues inutiles (protection), mais d'autres concernent des caractéristiques toujours présentes chez les bactéries (comme la paroi bactérienne).

2. Endosymbioses et évolution des eucaryotes.

Les cellules eucaryotes possèdent différents organites, comme le noyau, les mitochondries (siège de la respiration cellulaire) ou les chloroplastes (siège de la photosynthèse dans les cellules chlorophylliennes). Différentes études montrent que la présence des mitochondries et des chloroplastes dans les cellules eucaryotes actuelles résulterait de phénomènes d'endosymbiose très anciens.

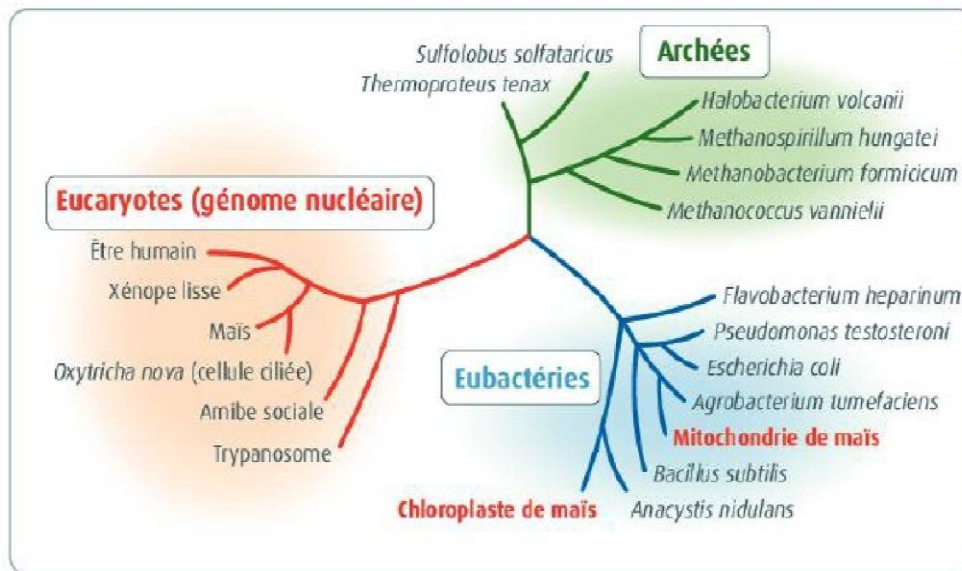
- **A l'aide des différents documents proposés, justifiez cette hypothèse sur l'origine des mitochondries et des chloroplastes.**
- Document 1 :** éléments de comparaison entre des organites cellulaires et des bactéries (TermSpé, Nathan, 2020)



Document 2 : comparaison du génome d'organites et de bactéries libres (TermSpé, Nathan, 2020)

Organite ou organisme	Espèce	Taille du génome (10 ³ nucléotides)	Nombre de gènes codant pour des protéines
Chloroplaste	Tabac	156	76
	Riz	134	76
	Maïs	140	76
	Pin	120	69
Cyanobactérie	Nostoc	6 413	5 368
	Synechocystis	3 573	3 168

Organite ou organisme	Espèce	Taille du génome (10 ³ nucléotides)	Nombre de gènes codant pour des protéines
Mitochondrie	Laminaire	38	39
	Arabette	367	31
α-protéobactérie	Caulobacter	4 017	3 767
	Mesorhizobium	7 596	7 281



5 **Position du génome des mitochondries et des chloroplastes au sein de l'arbre phylogénétique du vivant.** Cet arbre a été obtenu par comparaison de la séquence de certains gènes présents chez tous les êtres vivants. Les chloroplastes et les mitochondries proviennent de cellules de maïs. La comparaison des séquences d'ADN montre une ressemblance avec l'ADN d' α -protéobactéries pour l'ADN des mitochondries et avec l'ADN de cyanobactéries pour l'ADN des chloroplastes. Ces données ont été confirmées chez d'autres êtres vivants eucaryotes.

Les différents documents doivent nous permettre de justifier l'hypothèse selon laquelle les mitochondries et les chloroplastes sont des organites qui sont issus d'un phénomène d'endosymbiose.

Le **document 1** nous montre qu'il existe de nombreux points communs entre les organites d'une part et certaines bactéries : protéines, organisation de la membrane (double chez les organites et certaines bactéries), présence et structure du chromosome (souvent circulaire), mode de multiplication (par étranglement). Ces points communs peuvent laisser penser à une origine commune.

Le **document 3** est un arbre phylogénétique montrant les liens de parenté entre différentes espèces, les chloroplastes et les mitochondries du maïs. Cet arbre a été établi en comparant la séquence de certains gènes présents dans les chloroplastes, les mitochondries et l'ADN des espèces étudiées. Ces comparaisons montrent que les gènes des chloroplastes du maïs sont très étroitement parentés à ceux d'une bactérie, *Anacystis nedulans*, alors que ceux des mitochondries sont très apparentés à ceux de la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*. Dans les deux cas, le lien de parenté est plus étroit qu'avec toutes les autres espèces, en partie d'organismes eucaryotes. Ainsi, le génome des mitochondries humaines est plus proche de celui d'une bactérie que du génome nucléaire d'une cellule humaine. Ce constat peut s'interpréter en considérant que les chloroplastes et les mitochondries ont effectivement une origine bactérienne.

Le **document 2** nous indique un appauvrissement important du génome entre les bactéries libres et les chloroplastes, tout comme entre les bactéries libres et les mitochondries. Or, beaucoup des gènes bactériens codent pour des protéines qui devaient avoir un rôle biologique pour les bactéries. La réduction du nombre de gènes chez les mitochondries et chez les chloroplastes (par rapport aux bactéries d'origine) laisse envisager que l'endosymbiose s'est accompagnée d'un transfert de gènes entre la bactérie symbiotique et le génome des cellules eucaryote (ce qui est démontré par des études comparatives de certains gènes).

L'importance de ces transferts horizontaux est révélée par les **arbres phylogénétiques** (qui indiquent les relations de parenté entre espèces). En effet, ces arbres sont aujourd'hui établis essentiellement à partir de la comparaison des séquences d'ADN et de protéines des espèces.

Exercice : Les apports de l'expérience de Lederberg et Tatum sur les transferts de gènes chez les bactéries

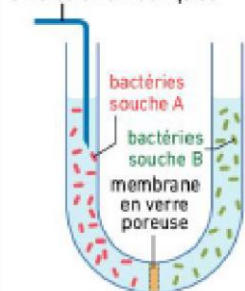
(d'après TermSpé, édition Bordas, 2020)

En 1946, J. Lederberg et E. Tatum ont isolé et cultivé des souches bactériennes mutantes d'*Escherichia coli* qui ne peuvent se développer sur milieu minimum, c'est-à-dire sur un milieu gélosé contenant les éléments nécessaires et suffisants au développement des bactéries de souche sauvage. L'une, appelée souche A, ne peut se développer que si l'on ajoute au milieu minimum les acides aminés thréonine (Thr) et leucine (Leu). L'autre, appelée souche B, ne se développe que si de l'acide aminé méthionine (Met) est ajouté au milieu minimum.

Expérience 1 : On cultive les souches A et B mélangées, sur milieu minimum. On constate alors le développement de bactéries.

Expérience 2 : On place chacune des souches dans un tube en U, en les séparant par une membrane en verre poreux. On aspire et refoule plusieurs fois le liquide dans le tube de façon à favoriser les échanges entre les deux compartiments du tube. Les bactéries A et B récupérées dans le tube sont toujours incapables de se développer isolément sur milieu minimum.

dispositif permettant aspiration et refoulement du liquide



La membrane en verre (0,2 µm d'épaisseur) empêche le contact direct entre les souches, mais laisse passer l'ADN libre et les substances solubles ainsi que les phages (virus).

■ Confrontez les résultats des expériences pour expliquer la différence des résultats obtenus dans les deux expériences.

Aides à la résolution

Proposition de correction

Dans cette expérience, deux souches différentes de bactéries *E. coli* (souche A et souche B) sont cultivées. Chaque souche est incapable de se développer seule car les mutations dont elles sont porteuses les rendent incapables de produire l'ensemble des acides aminés indispensables à leur développement. Les deux souches A et B étant porteuses de mutations différentes, leur exigence en acides aminés est différente.

L'expérience 1 (culture avec souches A et B mélangées) aboutit à un développement des bactéries. On en déduit qu'il y a eu modification génétique des bactéries rendant chaque souche capable de se développer. Cette modification s'explique par des transferts horizontaux de gènes entre les souches A et B. Plus précisément, nous pouvons déduire de ces résultats que des bactéries de la souche A ont du récupérer les allèles sauvages les rendant capables de produire de la thréonine et de la leucine et des bactéries de la souche B ont du récupérer l'allèle sauvage les rendant capables de produire de la méthionine.

L'expérience 2 (culture de bactéries des souches A et B séparées par une membrane de verre) aboutit à des résultats différents puisque les bactéries des deux souches sont restées incapables de se développer sur un milieu minimum. On en déduit qu'il n'y a donc pas eu modification génétique des bactéries.

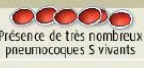
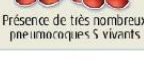
Seule la présence de la membrane de verre entre les deux souches bactériennes peut expliquer l'absence de modification génétique dans l'expérience 2 par rapport à l'expérience 1. Or, on nous indique que cette membrane empêche le contact direct entre des bactéries mais elle est perméable à l'ADN libre et aux virus.

Or, nous connaissons trois modes de modifications génétiques entre bactéries : la transformation (liée à un transfert d'ADN libre), la transduction (liée à un transfert d'ADN porté par un virus) et la conjugaison (liée à un transfert d'ADN par contact direct entre deux bactéries). Les conditions de l'expérience 2 nous montrent que la membrane en verre ne peut pas empêcher ni la transformation, ni la conjugaison.

Ainsi, la modification génétique des bactéries observée dans l'expérience 1 s'expliquait donc par un phénomène de conjugaison qui est rendu impossible avec la membrane.

Vérification de connaissances :

Expérience de Griffith (1928)

Expériences	État de la souris	Analyse du sang de la souris
 Pneumocoques S vivants	 Mort	 Présence de très nombreux pneumocoques S vivants
 Pneumocoques R vivants	 Survie	Absence de tout pneumocoque
 Pneumocoques S tués	 Survie	Absence de tout pneumocoque
 Pneumocoques S tués Pneumocoques R vivants	 Mort	 Présence de très nombreux pneumocoques S vivants

Pour chaque proposition, identifiez la bonne réponse.

1. Les expériences de Griffith (p. 58) montrent que :

- a. l'ADN peut être transféré d'un pneumocoque à l'autre.
- b. des pneumocoques tués peuvent contenir un facteur transformant.
- c. la virulence des pneumocoques ne peut pas évoluer au cours du temps.
- d. les pneumocoques tués sont encore virulents.

2. Les expériences de MacLeod (p. 58) montrent que :

- a. Griffith avait tort.
- b. les protéines, l'ADN et l'ARN sont capables de transformer les pneumocoques.
- c. les pneumocoques virulents peuvent mourir.
- d. le facteur transformant est probablement de l'ADN.

3. Un transfert horizontal de gènes :

- a. peut avoir lieu indépendamment de la reproduction sexuée.
- b. n'a lieu qu'entre des bactéries.
- c. est un événement rare à l'échelle de l'histoire de la vie.
- d. est lié à une relation endosymbiotique.

4. Les échanges de gènes entre bactéries :

- a. s'effectuent lorsqu'elles sont en symbiose.
- b. peuvent conférer un nouveau caractère à la bactérie receveuse.
- c. nécessitent que ces bactéries soient apparentées.
- d. ont lieu lorsqu'elles se divisent.

5. Les modalités des échanges génétiques entre bactéries sont :

- a. la conjugaison nécessite une libération d'ADN dans le milieu.
- b. la transduction est un transfert d'ADN par un virus.
- c. la transformation a lieu à l'aide d'un pont cytoplasmique entre les cellules.
- d. lorsqu'une cellule meurt, son ADN disparaît avec elle.

7. La transgénèse :

- a. est couramment utilisée sur l'organisme humain.
- b. est une biotechnologie réservée aux plantes génétiquement modifiées.
- c. permet de faire produire des protéines humaines par des bactéries.
- d. évite les transferts horizontaux de gènes.

8. Les arguments en faveur de la théorie endosymbiotique sont :

- a. les chloroplastes et mitochondries ont des parois comme les bactéries.
- b. l'ADN des chloroplastes et des mitochondries est le même que celui des eucaryotes.
- c. ces organites possèdent des ribosomes similaires à ceux des bactéries.
- d. leurs deux membranes sont de type bactérien.