Partie 3 : Une histoire du vivant

Elysia Chlorotica

L’arbre du vivant

Un ancêtre commun

Nous allons présenter ici quelques-uns des mécanismes qui ont permis une complexification des génomes au cours de l’évolution.

Plusieurs millions d’espèces actuelles ou passées.

Chapitre 5. L'enrichissement des génomes au cours de l'évolution

I. Des mécanismes se produisant lors de la reproduction sexuée

A. Les crossing-over inégaux créent des familles multigéniques

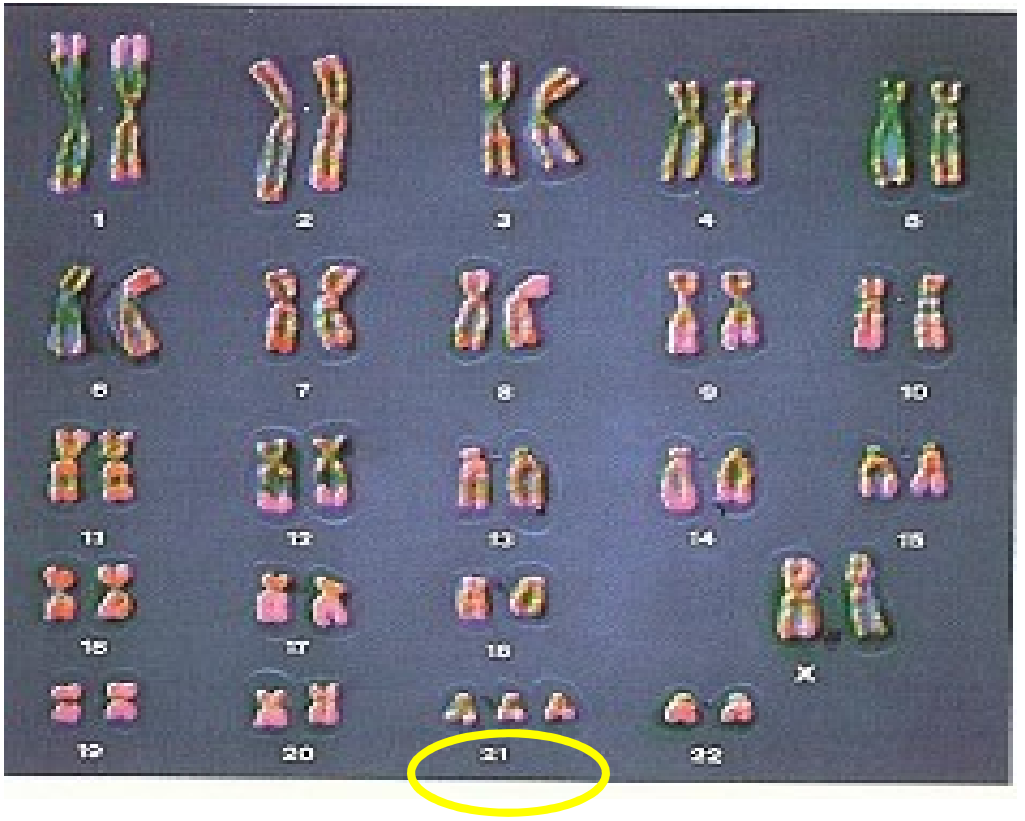
B. La polyploïdisation

II. Des mécanismes indépendants de la reproduction sexuée

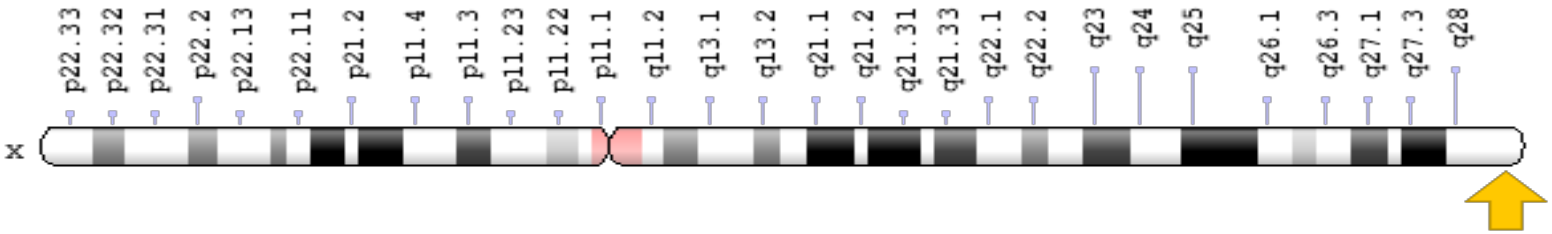
A – Les transferts horizontaux de gènes

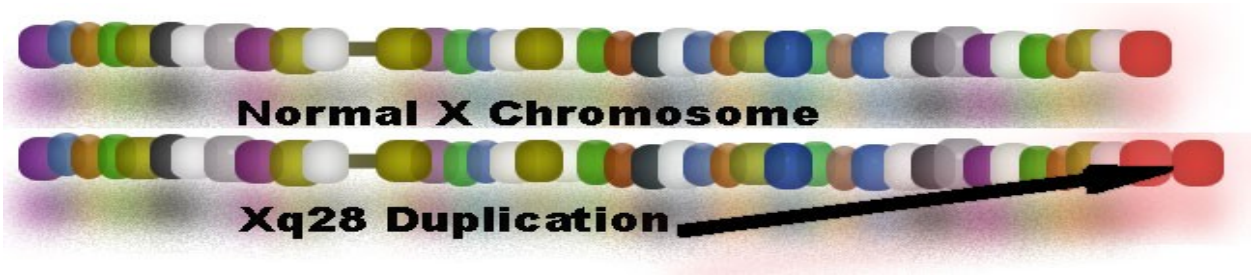
B – Les endosymbioses

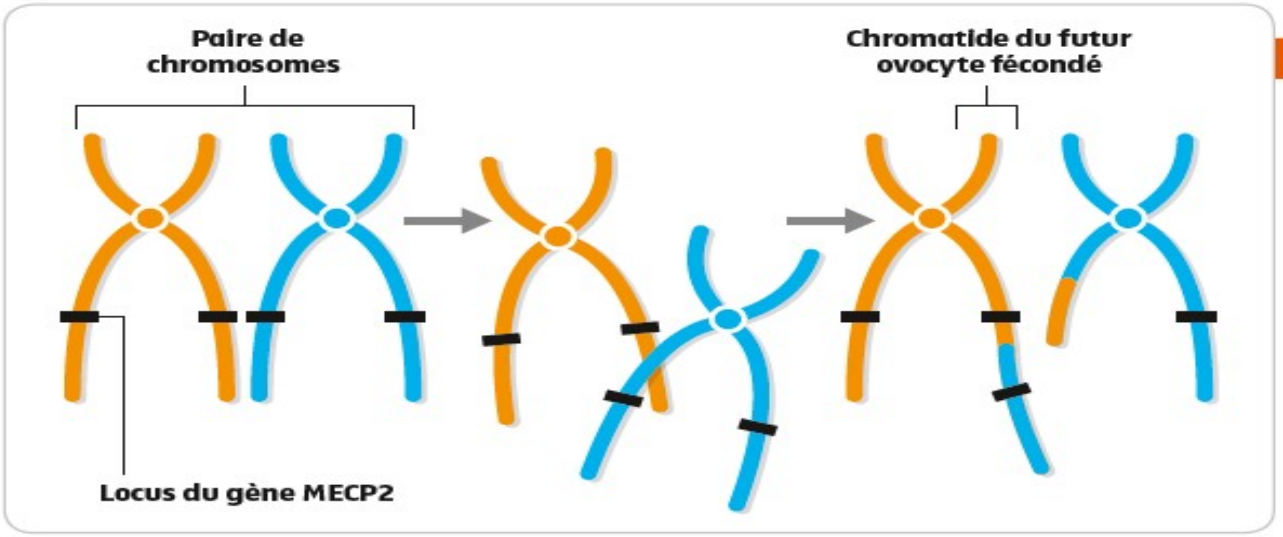
Syndrome de Down, mongolisme



Syndrome de duplication du gène MECP2







4 Représentation d'un crossing-over inégal en prophase 1 de méiose, chez la mère d'enfants atteints du syndrome de duplication du gène MECP2.
Le syndrome de duplication du gène MECP2 (situé sur le chromosome X) est une maladie rare. La surproduction de protéines due à la copie supplémentaire du gène est à l'origine d'un faible tonus musculaire, d'infections pulmonaires, d'un retard intellectuel et d'une courte espérance de vie.

Chapitre 5. L'enrichissement des génomes au cours de l'évolution

I. Des mécanismes se produisant lors de la reproduction sexuée

A. Les crossing-over inégaux créent des familles multigéniques

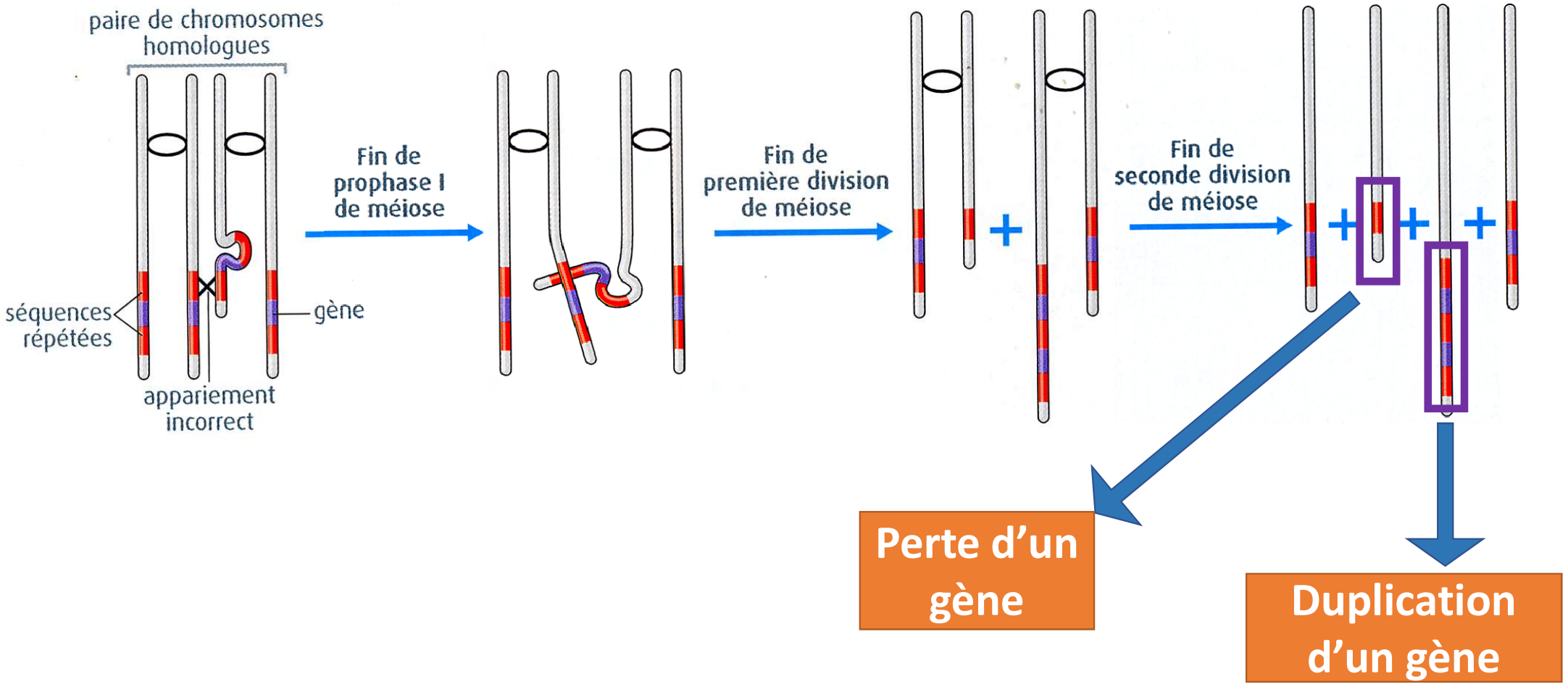
B. La polyploïdisation

II. Des mécanismes indépendants de la reproduction sexuée

A – Les transferts horizontaux de gènes

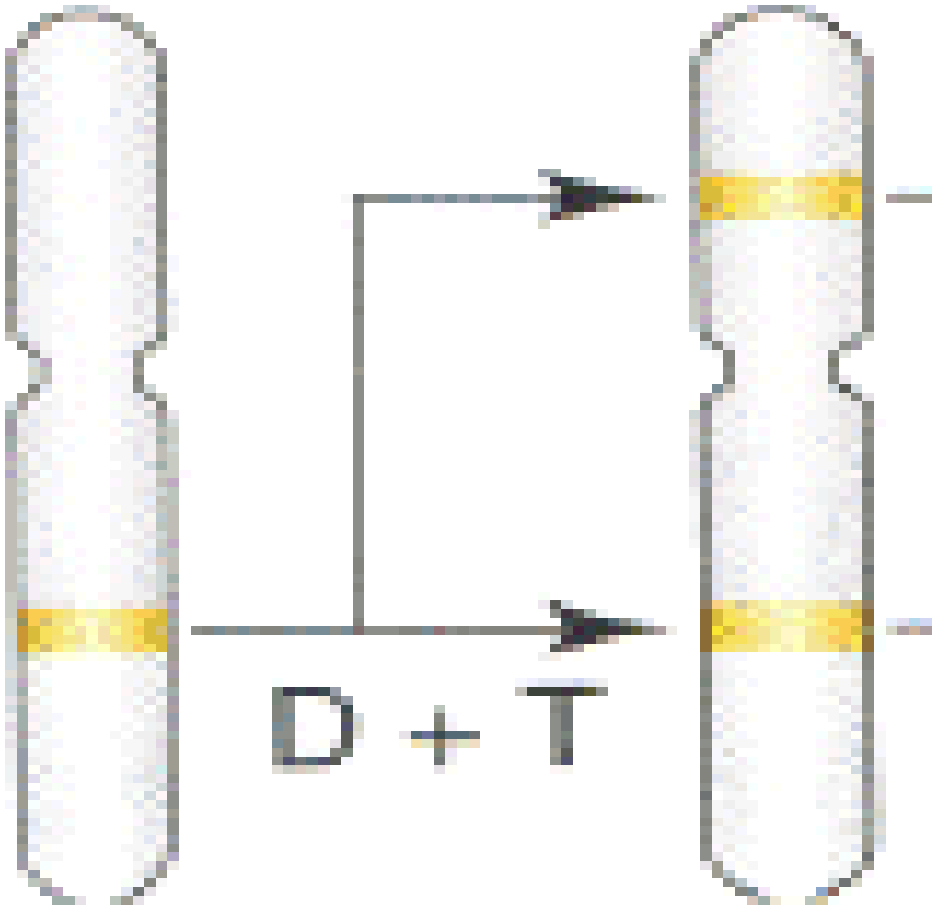
B – Les endosymbioses

Les crossing-over inégaux

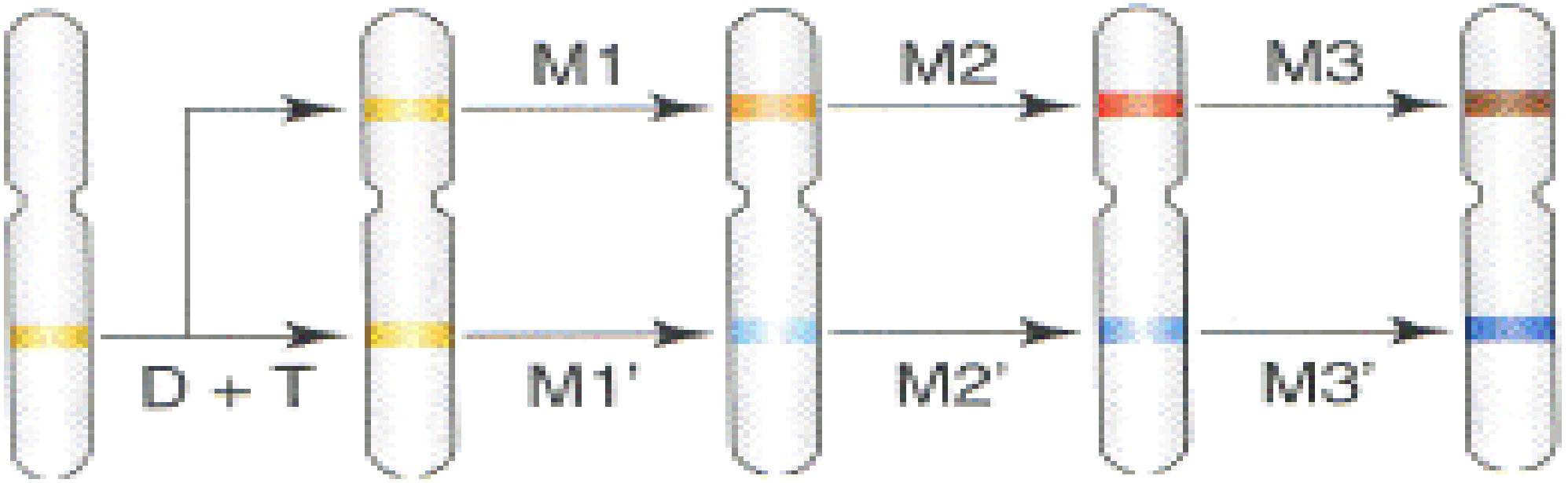


1 Les crossing-over inégaux. Dans certaines conditions, en prophase I de méiose, un appariement incorrect peut survenir, à l'origine d'un crossing-over qualifié d'inégal.

Duplication de gène



Divergence de séquences dupliquées par mutation



Les familles multigéniques

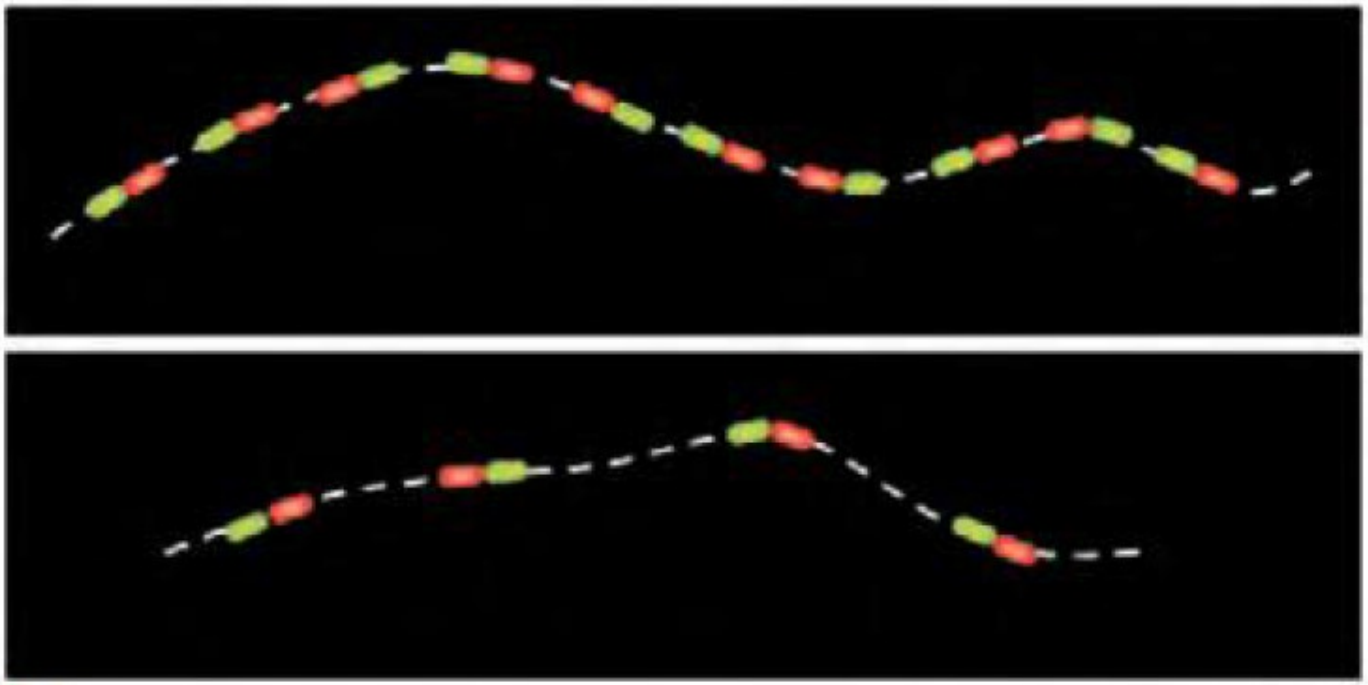
- ensemble de gènes possédant des **séquences très similaires** (par convention au moins 20%), issus d'un gène ancestral par duplications/transposition et mutations

Les familles multigéniques

- 1er cas : les copies gardent la même fonction → ex de l'amylase

Les familles multigéniques : l'amylase

Résultat d'un FISH (*Fluorescence in situ hybridization*)



10 copies sur 1 chromosome

4 copies

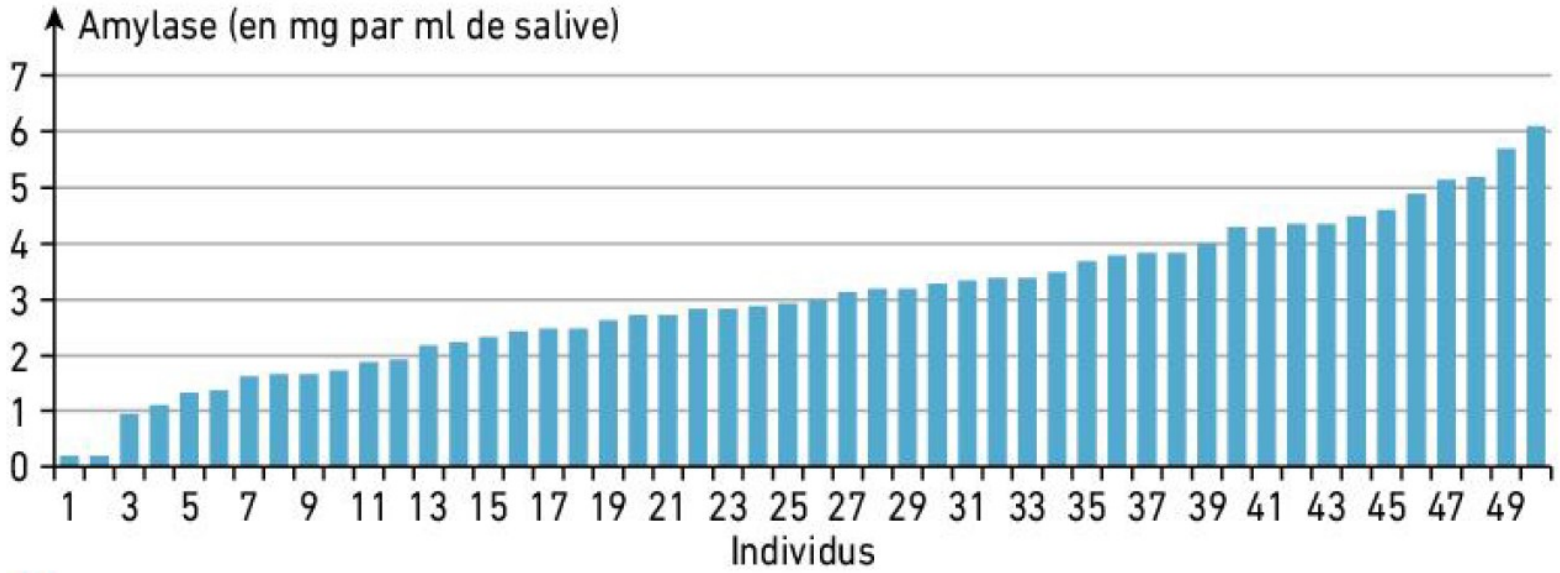
C **Mise en évidence chez un individu asiatique du nombre de copies du gène AMY1 sur ses deux chromosomes 1** (chaque association des deux sondes, rouge et verte, identifie une copie du gène).

Gène AMY : code pour l'amylase

[bordas]

Les familles multigéniques : l'amylase

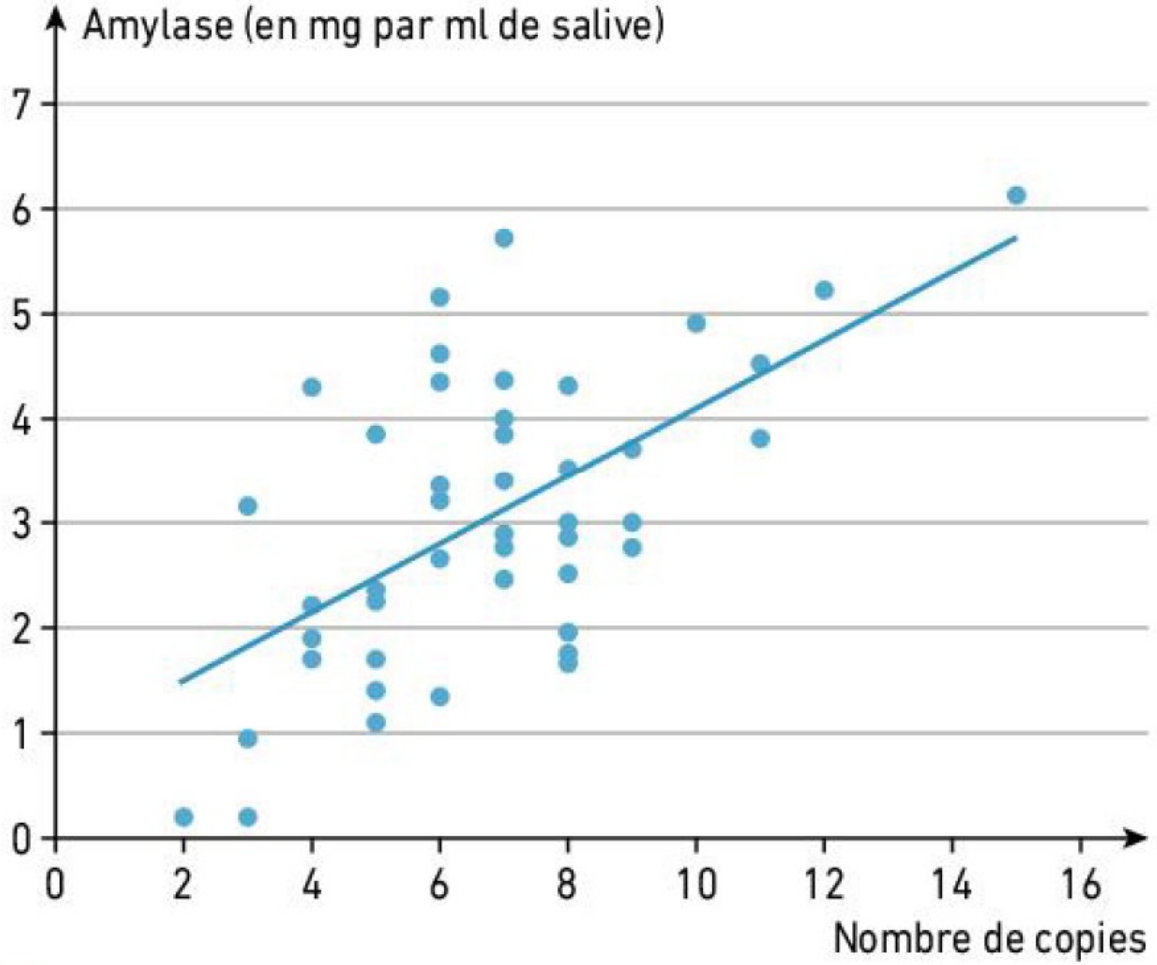
A Dans ce village indien, le riz est l'aliment principal.



B Quantité d'amylase salivaire mesurée chez 50 individus nord-américains.

[bordas]

Les familles multigéniques : l'amylase

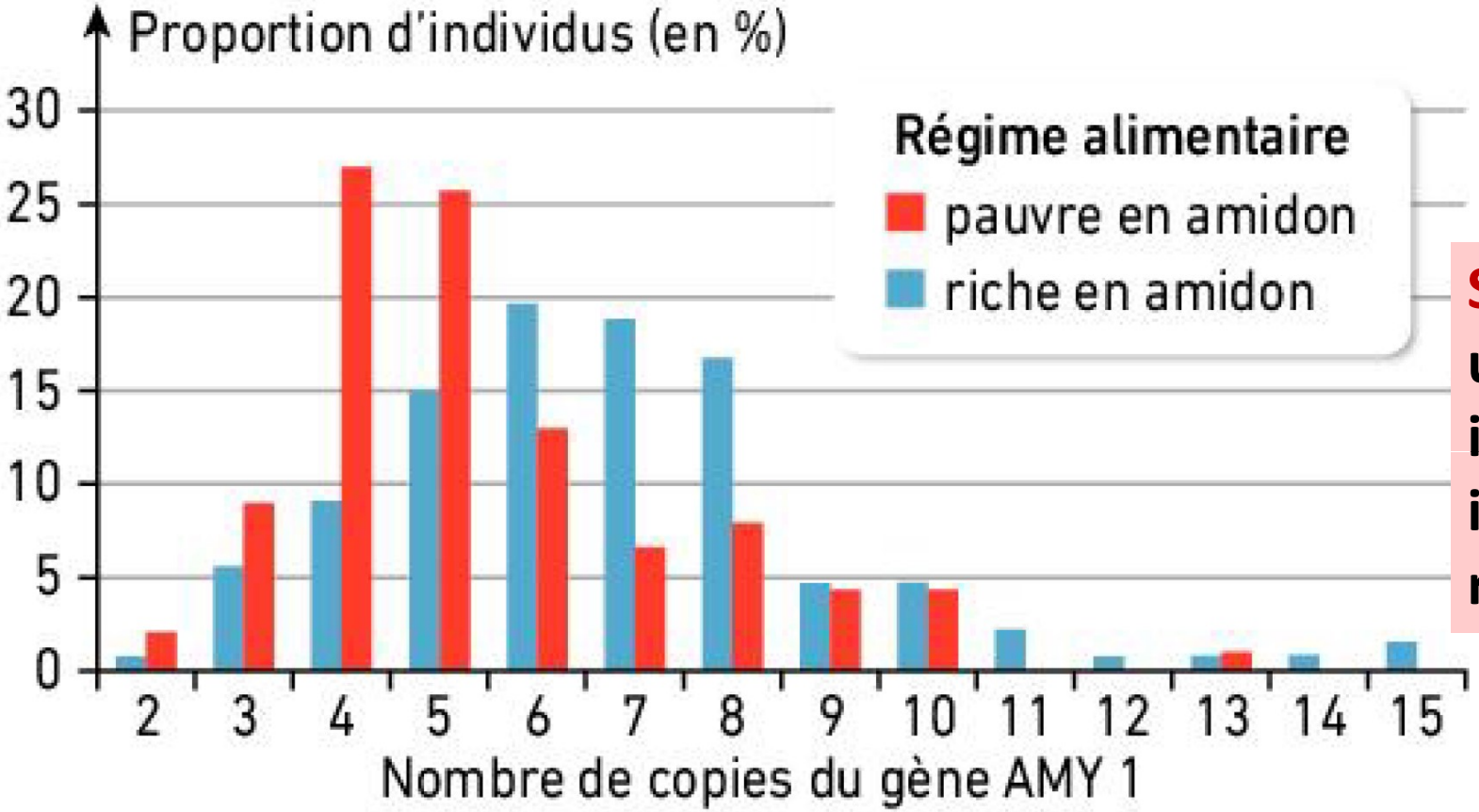


D Quantité d'amylase salivaire en fonction du nombre de copies du gène AMY1 pour les 50 individus nord-américains.

Plus le nombre de copies des gènes est grand, plus la production d'amylase est importante

[bordas]

Les familles multigéniques : l'amylase



E Répartition du nombre de copies du gène AMY1 dans deux populations à régime alimentaire différent.

D'après George H. Perry & Al. Nature Genetics – 2007.

Sélection naturelle : un nb de copies important avantage les individus ayant un régime riche en amidon

[bordas]

Les familles multigéniques : l'amylase

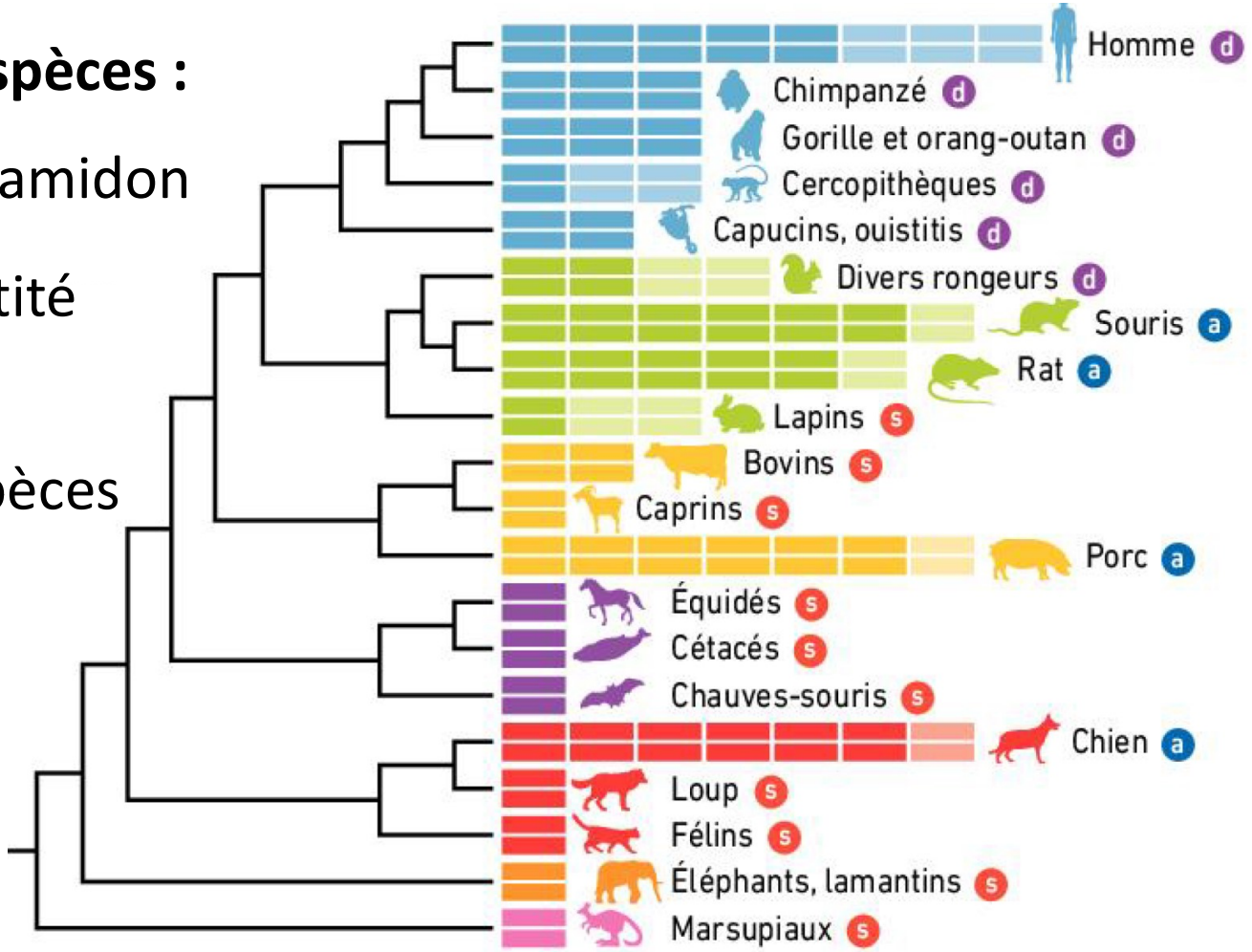
Généralisation de l'étude à 84 espèces :

- **s** = régime spécialisé **pauvre** en amidon

- **d** = régime contenant une quantité significative d'amidon

- **a** = régime **riche** en amidon, espèces vivant au contact de l'homme
(= **domestiquées**)

Rq : Chez l'Homme, 12% du génome a subi des duplications

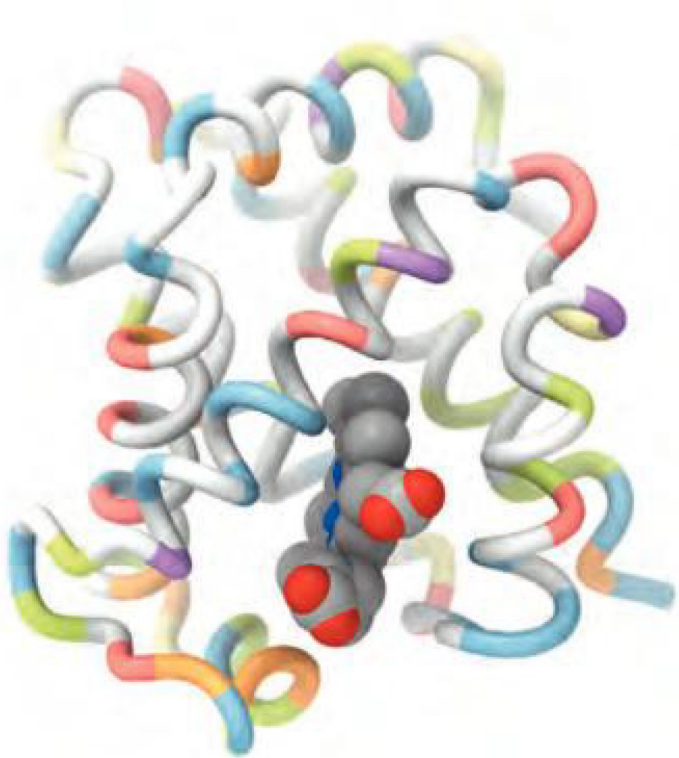


Arbre phylogénétique* de quelques mammifères indiquant le nombre de copies du gène AMY1. Les rectangles plus clairs correspondent à des variantes dans le nombre de copies. *D'après P. Pajic & Al. eLife, mai 2019.*

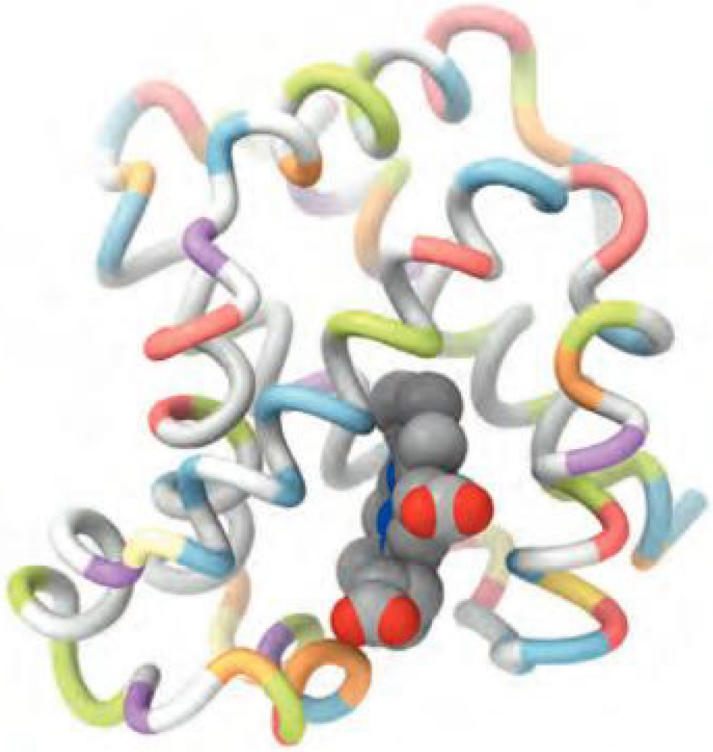
Les familles multigéniques

- 1er cas : les copies gardent la même fonction → ex de l'amylase
- 2nd cas: les copies deviennent différentes et permettent la production de protéines différentes → ex des globines et des opsines

Les familles multigéniques : les globines



α globine : 141 acides aminés



γ globine : 146 acides aminés

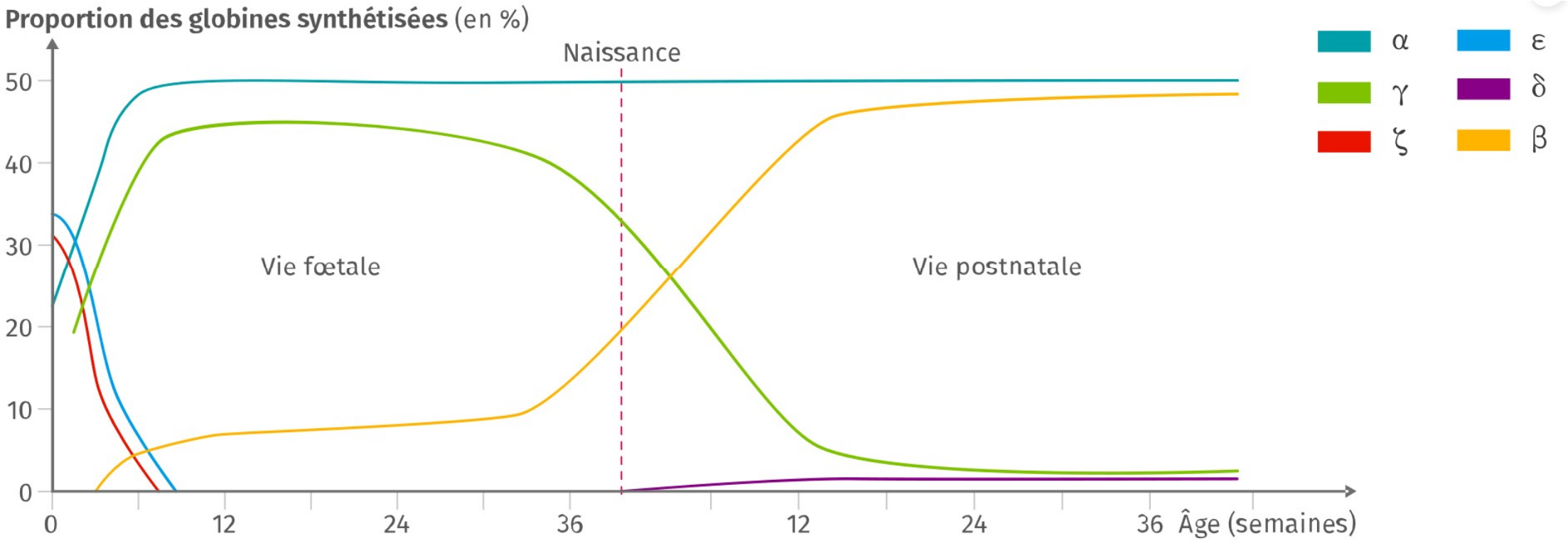
ζ globine : 141 acides aminés

A Modélisation 3D de trois globines humaines produites à différents moments de la vie (représentation du squelette carboné, coloration des acides aminés, représentation du cofacteur hème fixant le dioxygène en sphères).

[bordas]

Les familles multigéniques : les globines

Expression des globines au cours du développement

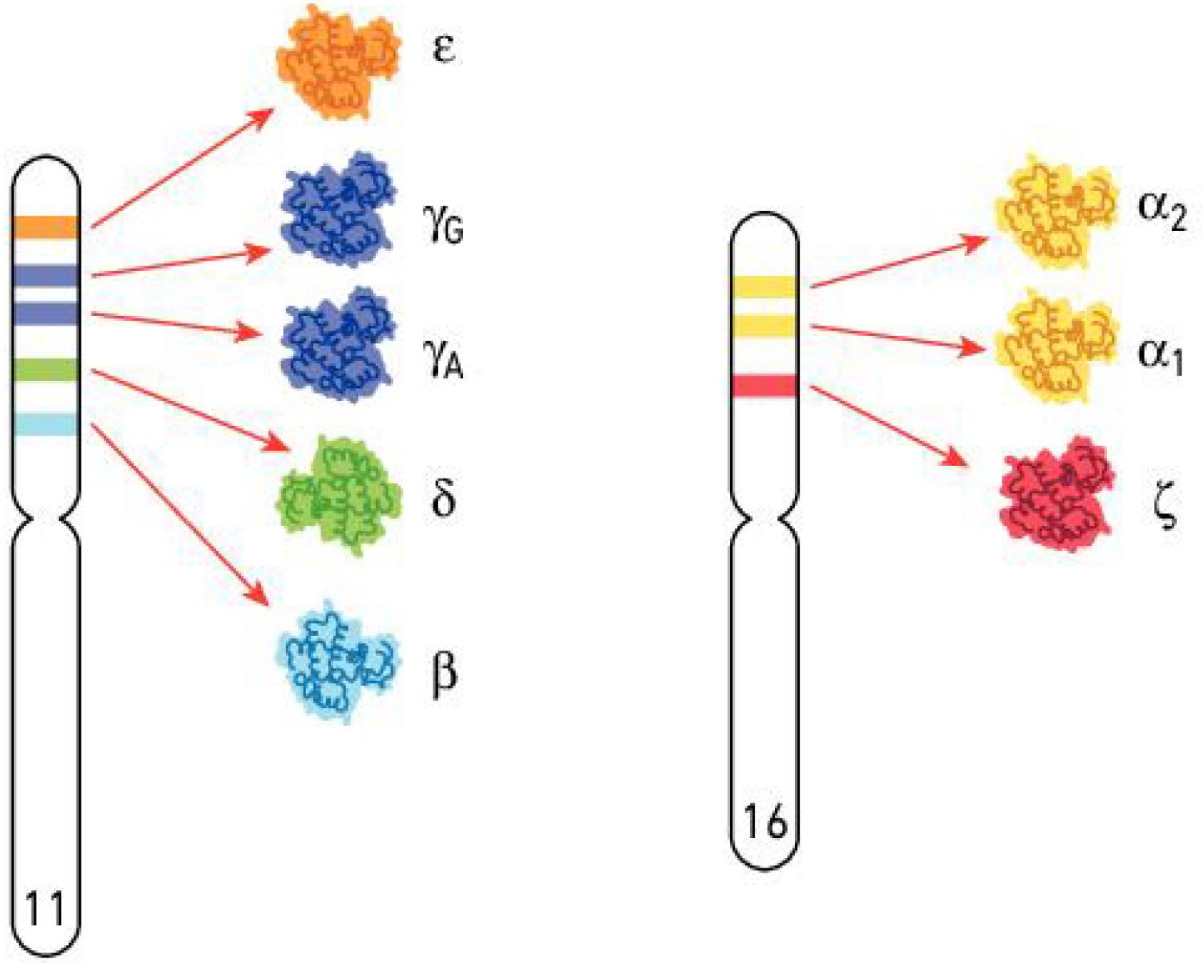


Proportion des différentes chaînes de globine au cours de la vie.

L'hémoglobine fœtale, de forme α2γ2, a une très forte affinité pour le dioxygène, ce qui permet le transfert de celui-ci du sang maternel au sang fœtal

[Le livre scolaire]

Les familles multigéniques : les globines



C Localisation chromosomique des gènes codant les différentes globines humaines.

[bordas]

Les familles multigéniques : les globines

					5				10				15				20				25				30				35				40				45				50				55	
alpha1	-	M	V	L	S	P	A	D	K	T	N	V	K	A	A	W	G	K	V	G	A	H	A	G	E	Y	G	A	E	A	L	E	R	M	F	L	S	F	P	T	T	K	T	Y	F	P	H	F	-	D	L	S	-	-	H	-
alpha2	-	M	V	L	S	P	A	D	K	T	N	V	K	A	A	W	G	K	V	G	A	H	A	G	E	Y	G	A	E	A	L	E	R	M	F	L	S	F	P	T	T	K	T	Y	F	P	H	F	-	D	L	S	-	-	H	-
theta	-	M	A	L	S	A	E	D	R	A	L	V	R	A	L	W	K	K	L	G	S	N	V	G	V	Y	T	T	E	A	L	E	R	T	F	L	A	F	P	A	T	K	T	Y	F	S	H	L	-	D	L	S	-	-	P	-
zeta	-	M	S	L	T	K	T	E	R	T	I	I	V	S	M	W	A	K	I	S	T	Q	A	D	T	I	G	T	E	T	L	E	R	L	F	L	S	H	P	Q	T	K	T	Y	F	P	H	F	-	D	L	H	-	-	P	-
gammaA	M	G	H	F	T	E	E	D	K	A	T	I	T	S	L	W	G	K	V	N	-	-	V	E	D	A	G	G	E	T	L	G	R	L	L	V	V	Y	P	W	T	Q	R	F	F	D	S	F	G	N	L	S	S	A	S	A
gammaG	M	G	H	F	T	E	E	D	K	A	T	I	T	S	L	W	G	K	V	N	-	-	V	E	D	A	G	G	E	T	L	G	R	L	L	V	V	Y	P	W	T	Q	R	F	F	D	S	F	G	N	L	S	S	A	S	A
epsilon	M	V	H	F	T	A	E	E	K	A	A	V	T	S	L	W	S	K	M	N	-	-	V	E	E	A	G	G	E	A	L	G	R	L	L	V	V	Y	P	W	T	Q	R	F	F	D	S	F	G	N	L	S	S	P	S	A

A **Alignement partiel des séquences d'acides aminés des protéines issues des huit gènes codant pour les globines humaines.** Chaque lettre correspond à un acide aminé ; les acides aminés identiques à ceux de la séquence de référence sont indiqués en rouge. Les séquences sont alignées, c'est-à-dire que des décalages sont introduits afin de trouver le maximum de correspondances.

[bordas]

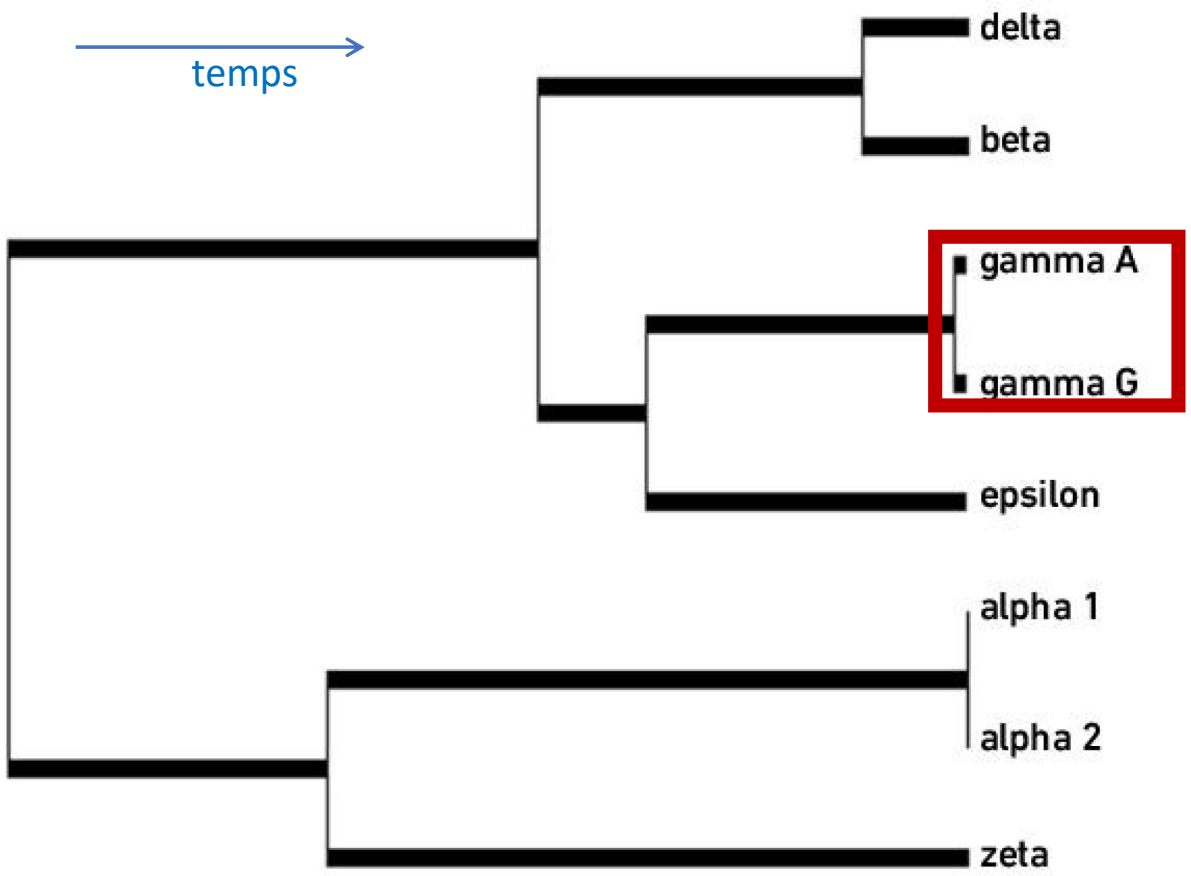
Les familles multigéniques : les globines

	alpha1	alpha2	zeta	gammaA	gammaG	epsilon	delta	beta
alpha1	0	0	55	81	81	85	78	77
alpha2		0	55	81	81	85	78	77
zeta			0	83	83	83	85	87
gammaA				0	1	27	40	37
gammaG					0	28	39	36
epsilon						0	38	33
delta							0	9
beta								0

B **Matrice des distances entre les protéines issues des gènes des globines.** Les valeurs correspondent au nombre d'acides aminés différents (sur 146 au total).

[bordas]

Les familles multigéniques : les globines



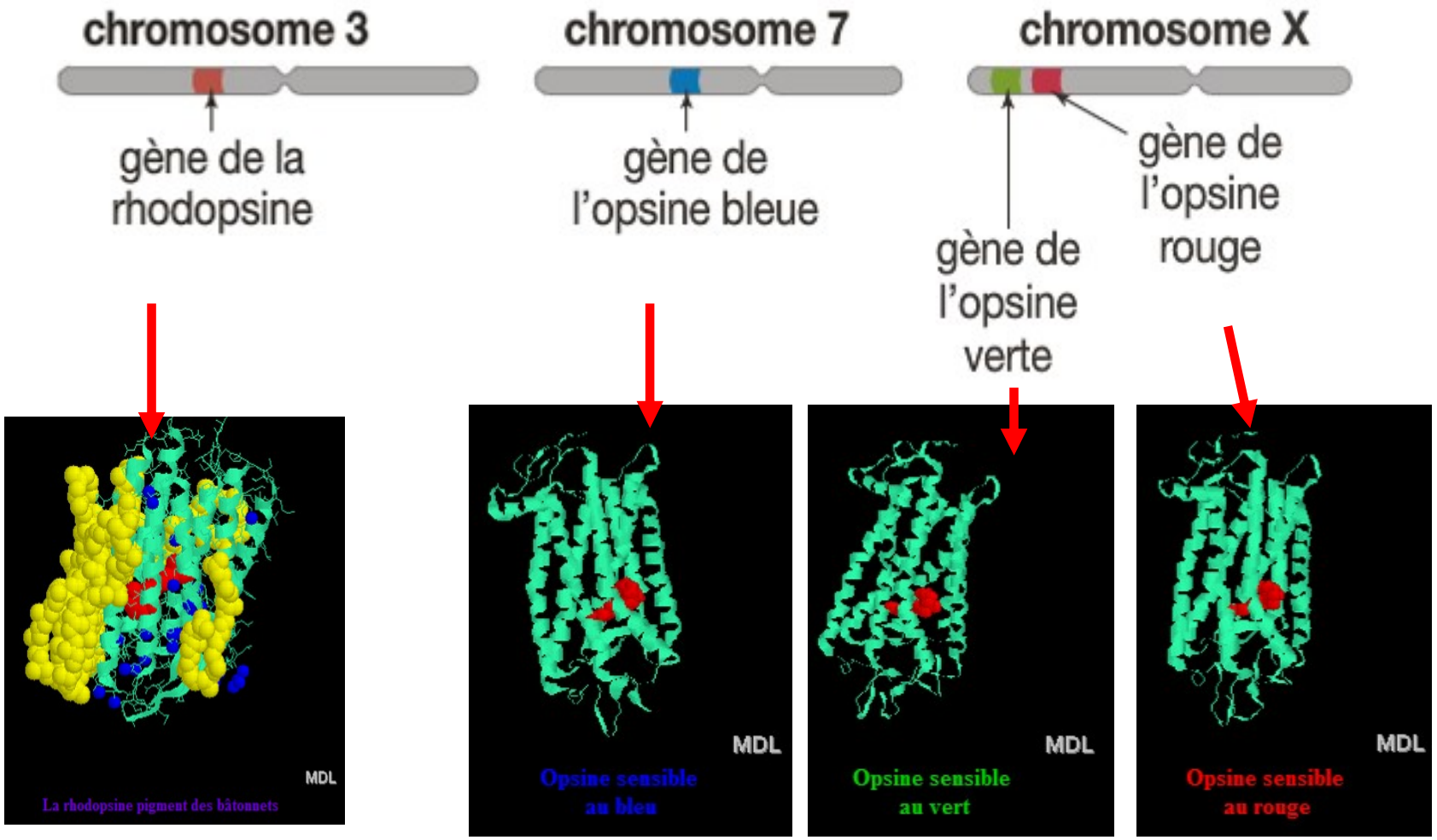
B Arbre phylogénétique retraçant l'histoire des globines.

	Types d'hémoglobine	Âge du plus ancien fossile connu (en Ma)
Vertébrés sans mâchoire (ex : lamproie)	primitive à une seule chaîne	500
Poissons à nageoires rayonnées, amphibiens	à deux types de chaînes α et β	420
Sauropsidés*	chaînes de type α, β, γ	320
Mammifères non primates	chaînes de type $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$	220
Mammifères primates	chaînes de type $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon,$	55
Macaques et primates hominoïdes*	chaînes de type α, β, δ γ_A, γ_G ε.	20

C Globines présentes chez divers groupes de vertébrés.

[bordas]

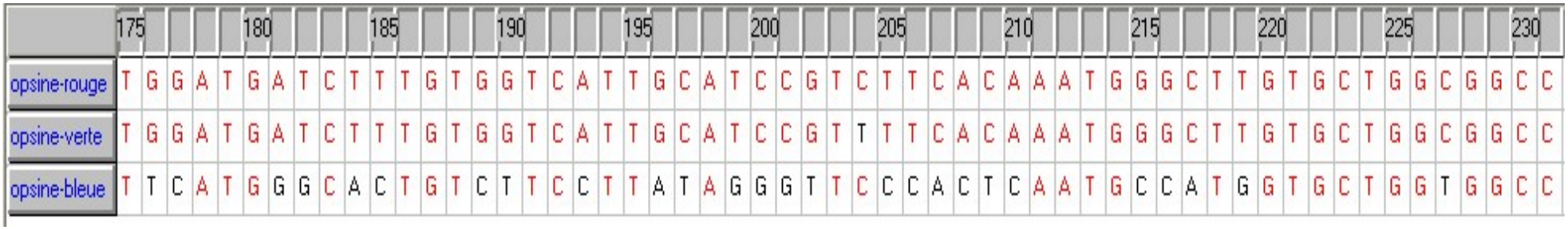
Les familles multigéniques : les opsines



-> conservation de la structure 3D (et de la fonction = vision)

Les familles multigéniques : les opsines

Comparaison des séquences nucléiques des gènes des opsines



	175			180			185			190			195			200			205			210			215			220			225			230
opsine-rouge	T	G	G	A	T	G	A	T	C	T	T	T	G	T	G	G	T	C	A	T	T	G	C	A	T	C	C	G	T	C	T	T	C	A	C	A	A	A	T	G	G	G	C	T	T	G	T	G	C	T	G	G	C	G	G	C	C
opsine-verte	T	G	G	A	T	G	A	T	C	T	T	T	G	T	G	G	T	C	A	T	T	G	C	A	T	C	C	G	T	T	T	T	C	A	C	A	A	A	T	G	G	G	C	T	T	G	T	G	C	T	G	G	C	G	G	C	C
opsine-bleue	T	T	C	A	T	G	G	G	C	A	C	T	G	T	C	T	T	C	C	T	T	A	T	A	G	G	G	T	T	C	C	C	A	C	T	C	A	A	T	G	C	C	A	T	G	G	T	G	C	T	G	G	T	G	G	C	C

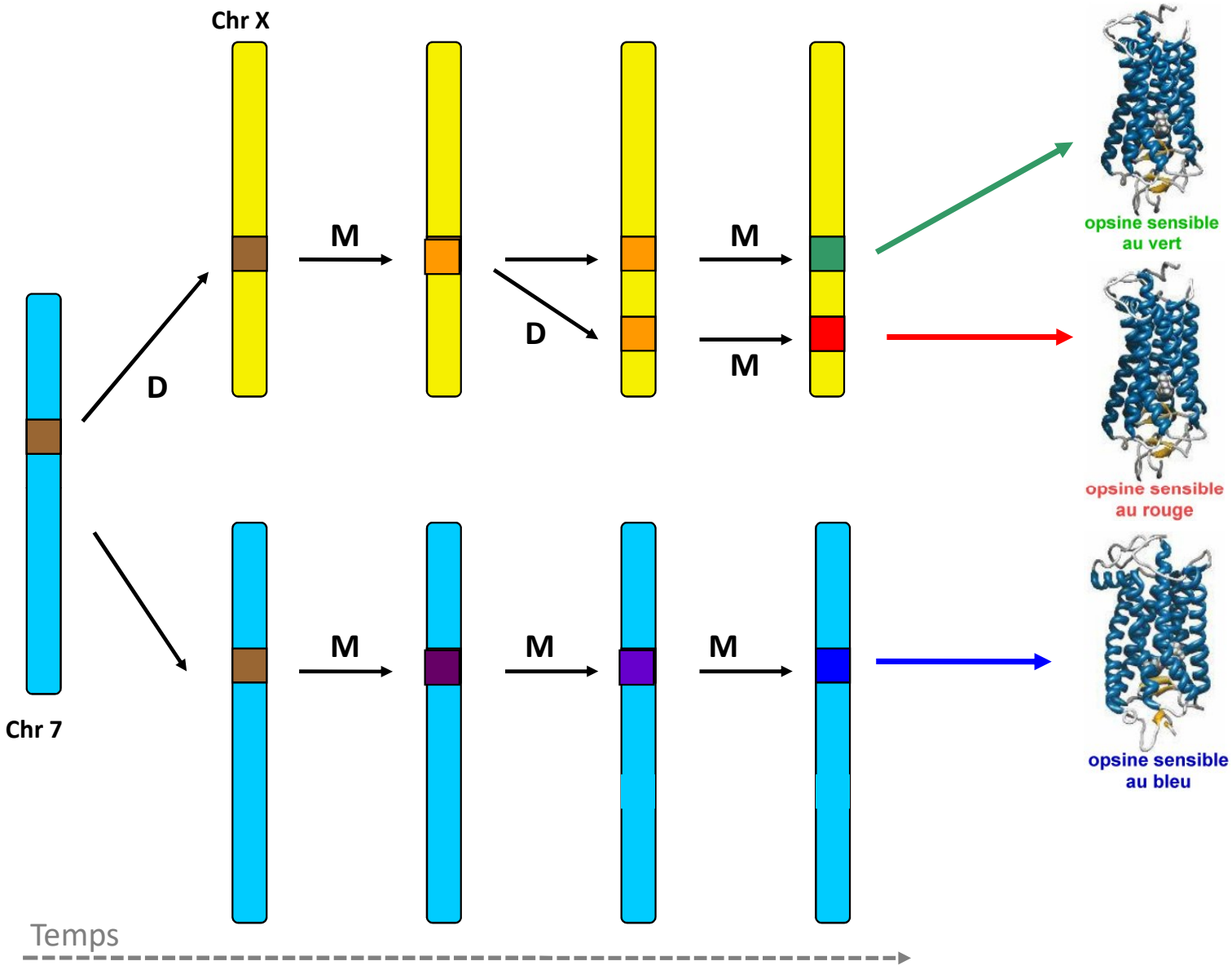
Demi matrice des distances

	opsine-rouge	opsine-verte	opsine-bleue
opsine-rouge	0	1.69	39.8
opsine-verte		0	39.9
opsine-bleue			0

% de différences entre le gène de l'opsine bleue et le gène de l'opsine rouge

Les gènes des opsines ont plus de 60% de leurs séquences en commun

Histoire évolutive de la famille des opsines

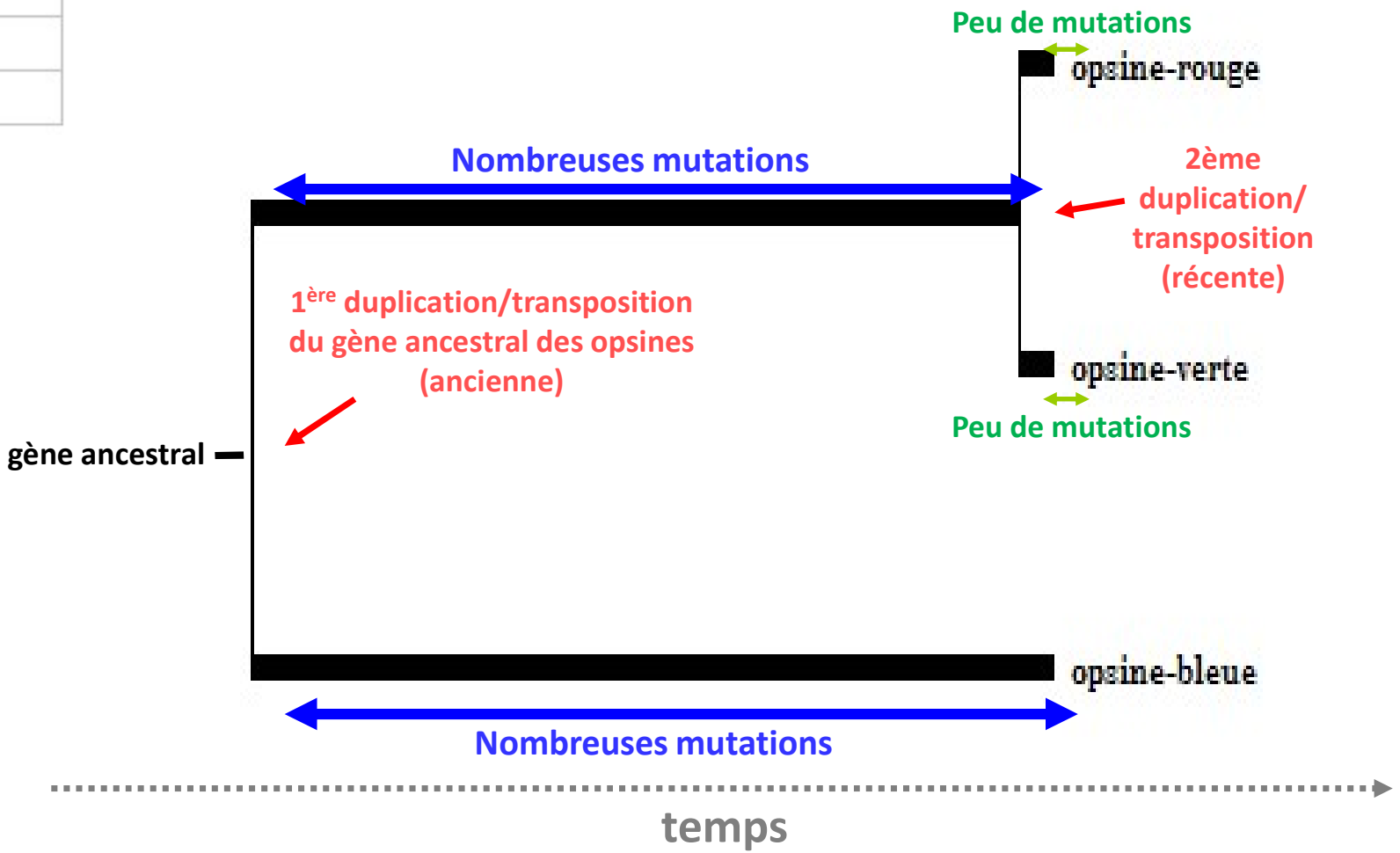


D = Duplication

M = Mutation

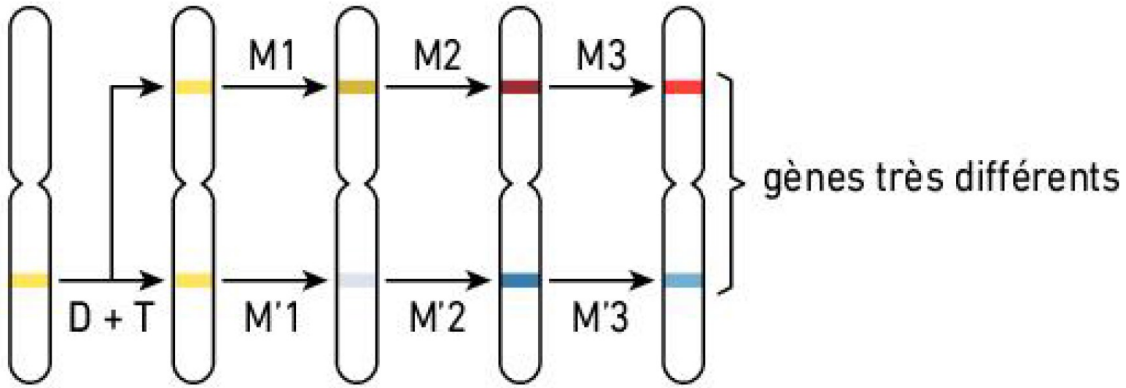
Histoire évolutive de la famille des opsines

	opsine-rouge	opsine-verte	opsine-bleue
opsine-rouge	0	1.69	39.8
opsine-verte		0	39.9
opsine-bleue			0

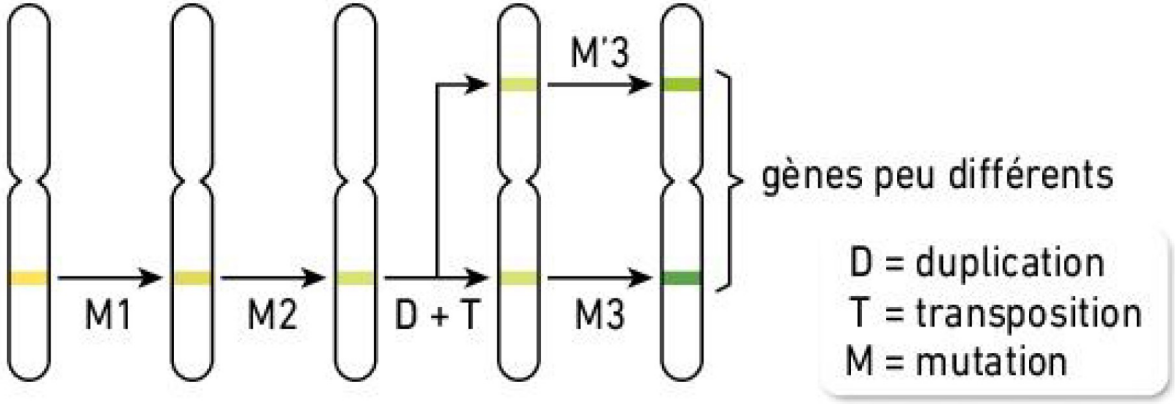


Âge de la duplication et divergence des copies

• Cas d'une duplication ancienne



• Cas d'une duplication récente



A Relation entre l'ancienneté d'une duplication et le degré de différence séparant les gènes qui en sont issus.

Les familles multigéniques

- ensemble de gènes possédant des **séquences très similaires** (par convention au moins 20%), issus d'un gène ancestral par duplications/transposition et mutations

Permet

- **Enrichissement du génome** *(↗nb gènes)*
- **Diversification du génome** *(apparition de gènes ≠ codant pour des protéines ≠)*

Chapitre 5. L'enrichissement des génomes au cours de l'évolution

I. Des mécanismes se produisant lors de la reproduction sexuée

A. Les crossing-over inégaux créent des familles multigéniques

B. La polyploïdisation

II. Des mécanismes indépendants de la reproduction sexuée

A – Les transferts horizontaux de gènes

B – Les endosymbioses

Quelques définitions :

- **<u>Polyploïde</u>** = cellule ou noyau ou organisme possédant plus de deux jeux complets de chromosomes.

/!\ *Différent de trisomie qui ne conserve qu'un chromosome !*

Autoploïde : les lots de chromosomes proviennent de la même espèce

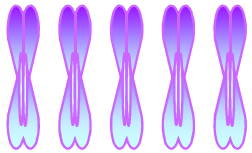
Alloploïde : si les lots de chromosomes proviennent de deux espèces différentes

<u>Hybridation</u> = croisement entre deux espèces différentes *(ou entre deux races /variétés différentes).*

Polyploïdie

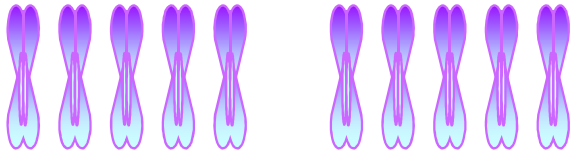
Notons
n = 1 lot complet de chromosomes
(n est la ploïdie)

Haploïde
n=5



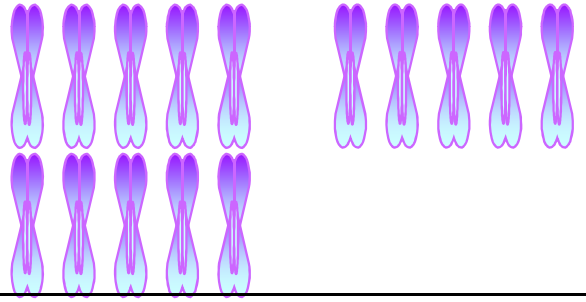
Cas de nos gamètes

Diploïde
2n=10

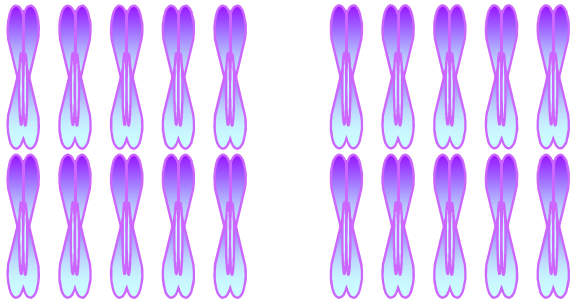


Cas de nos cellules somatiques

Triploïde
3n=15



Tétraploïde
4n=20



Pentaploïde (5n)
Hexaploïde (6n)
Heptaploïde (7n)
Octaploidïe (8n) ….

Des exemples d'espèces polyploïdes

AUTOPOLYPLOIDE : duplication des chromosomes au sein de la même espèce

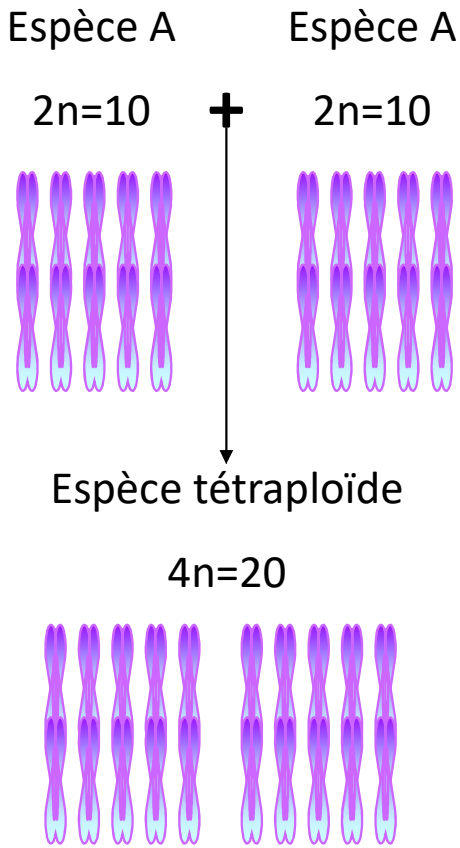
Pomme de terre – **4**n - 48 chromosomes
Banane – **3n** – 33 chromosomes
Cacahuète – **4n** – 40 chromosomes
Patate douce – **6n**– 90 chromosomes

ALLOPOLYPLOIDE : Hybridation entre deux ou plusieurs espèces

Tabac – **4n** – 48 chromosomes
Coton – **4n** – 52 chromosomes
Blé tendre – **6n** – 42 chromosomes
Avoine – **6n** – 42 chromosomes
Canne à sucre – **8n** – 80 chromosomes
Fraise – **8n** –56 chromosomes

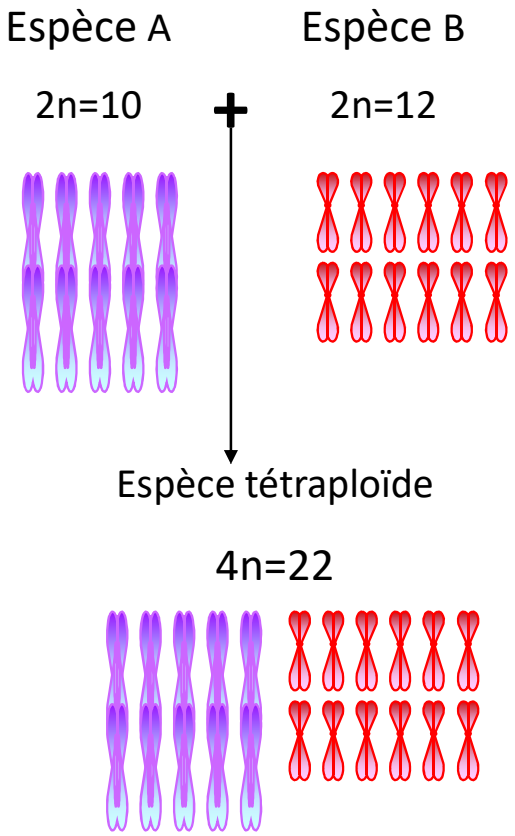
Très souvent sélectionné lors de la domestication des espèces

Autoploïdie



duplication du **même** génome

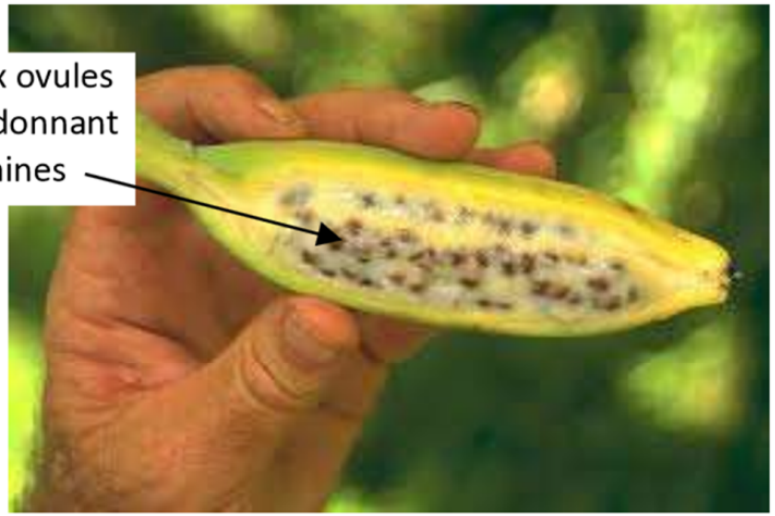
Alloploïdie

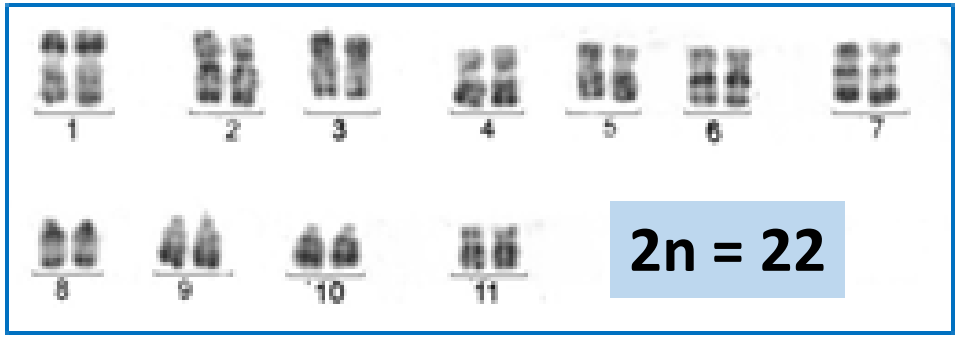


association de génomes **différents**

Un exemple d'espèce polyploïde : la banane (autoploïde)

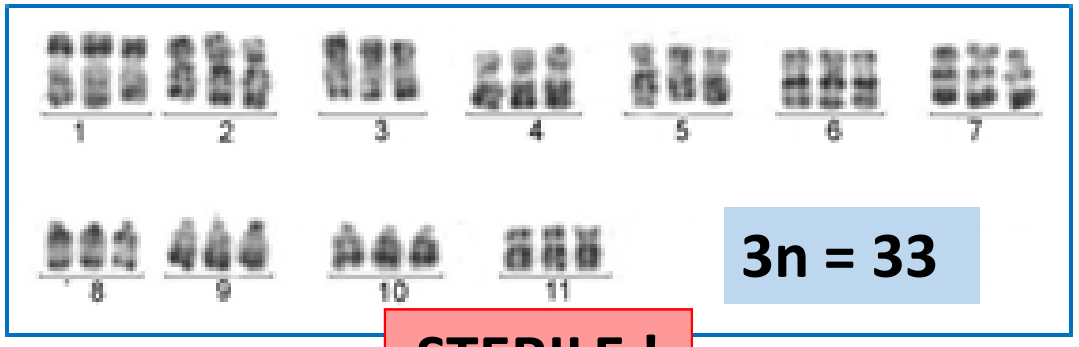
Banane sauvage





2n = 22

Banane domestique

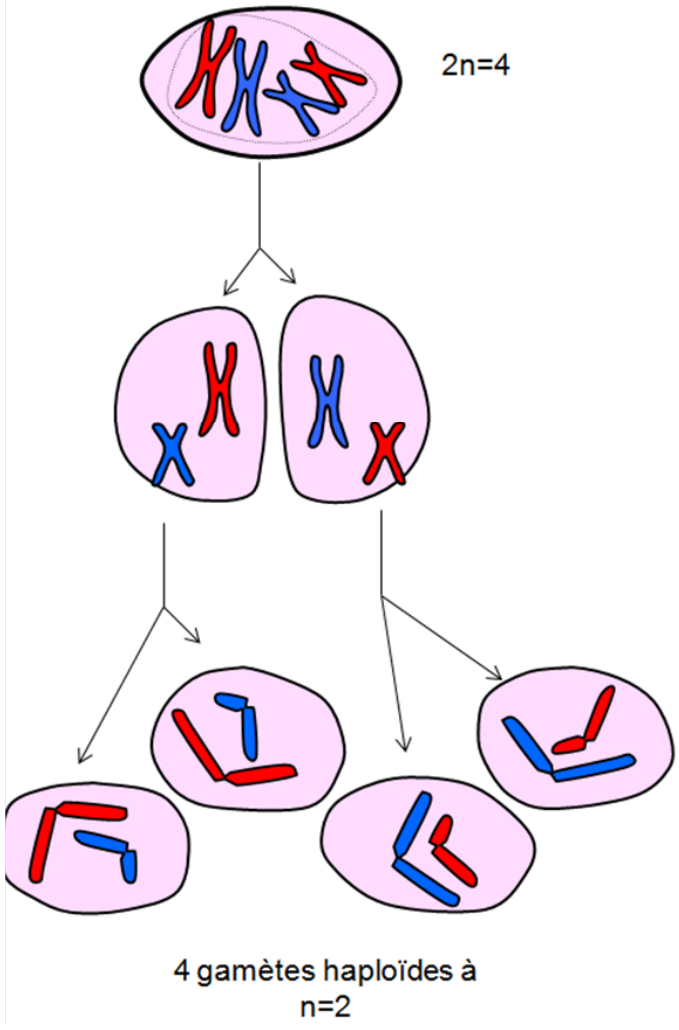


3n = 33

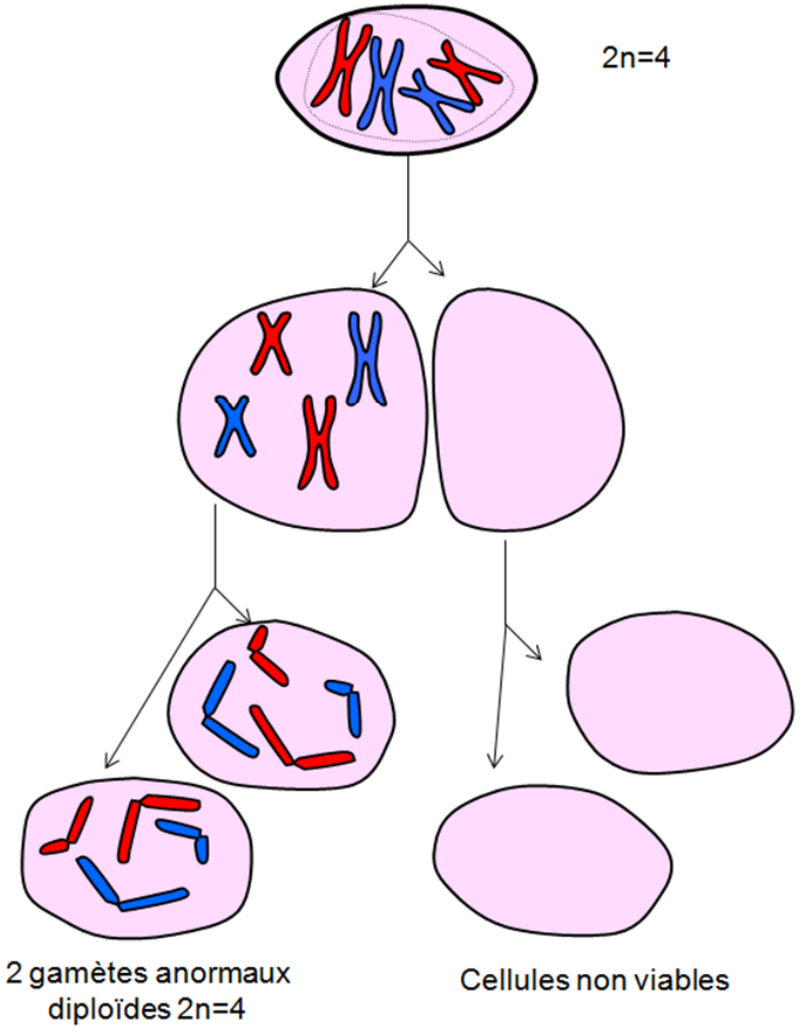
STERILE !

Un exemple d'espèce polyploïde : la banane (autoploïde)

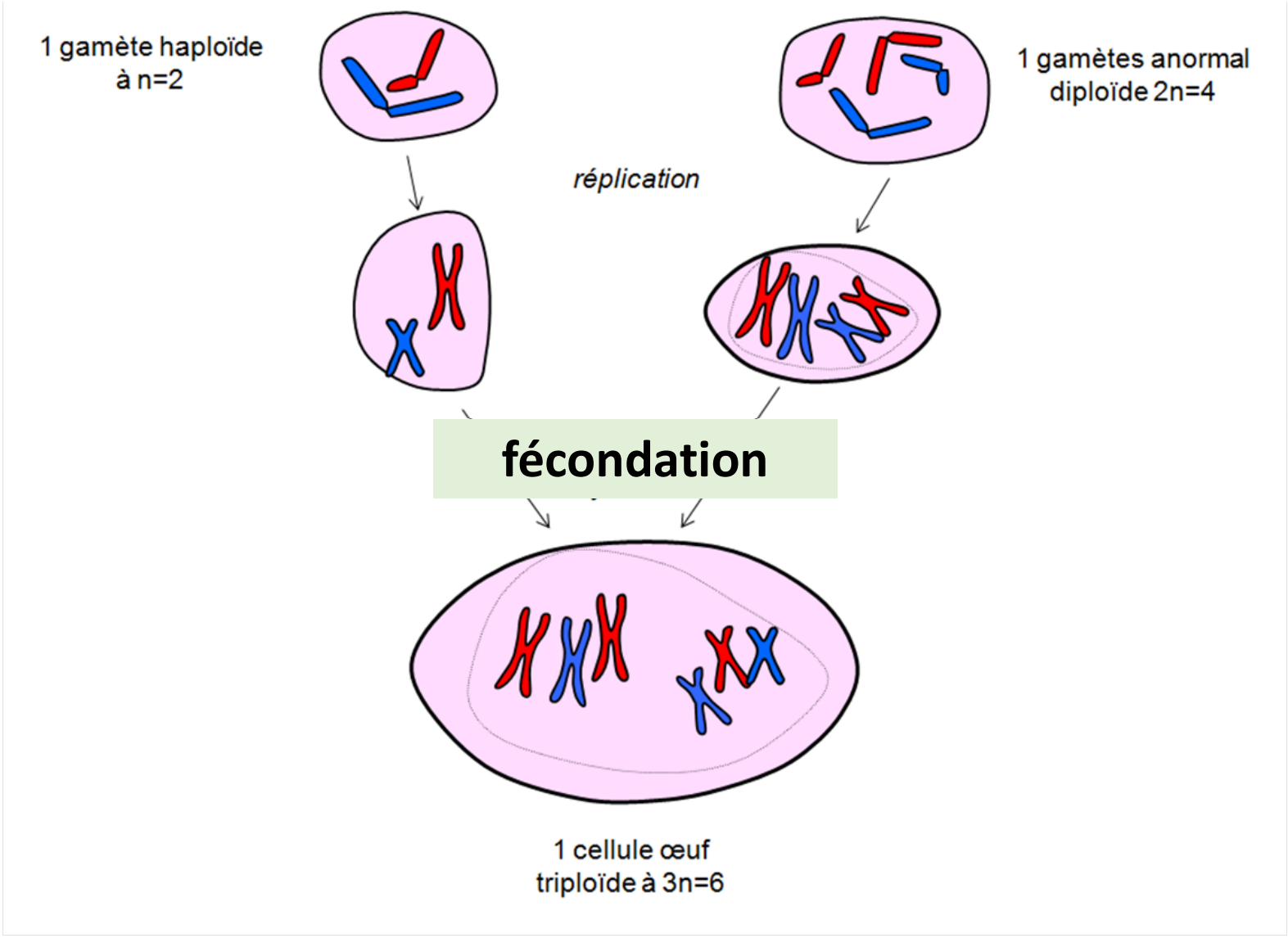
Méiose normale



Méiose anormale



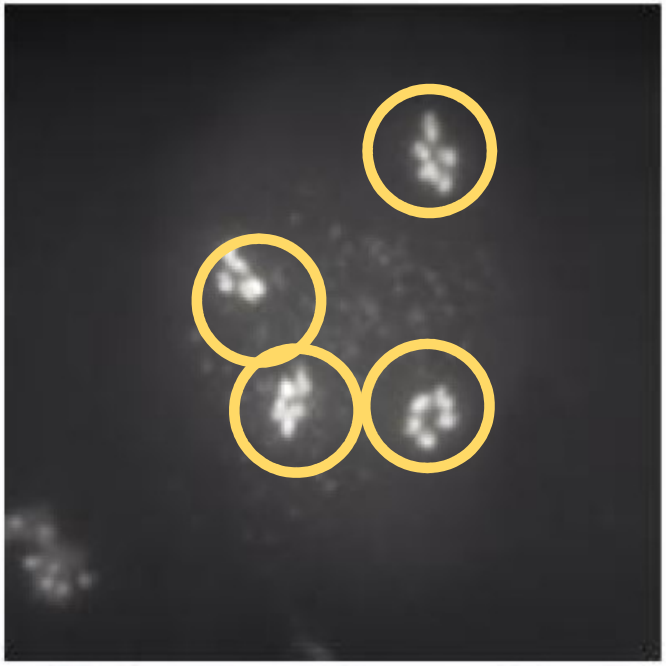
Un exemple d'espèce polyploïde : la banane (autoploïde)

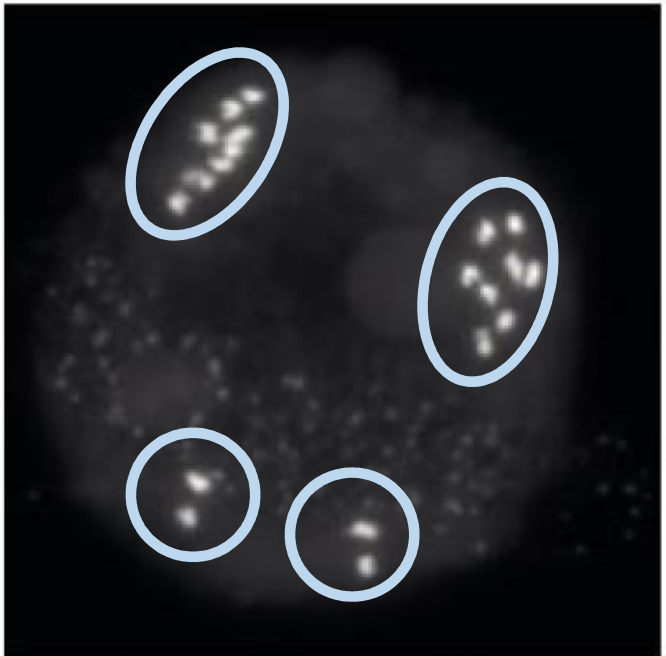


Des anomalies de méioses peuvent être à l'origine des polyploïdies

Chez *Arabidopsis thaliana* (angiosperme - **2n = 10**)

Mutation du gène ***mer3***, gène impliqué dans l'appariement des chromosomes au cours de la méiose





Mauvaise répartition des chromosomes dans les 4 gamètes

L'utilisation de sondes fluor
rendre observable en micro
chromosomes lors de la mé
(futurs grains de pollen) issues d'une méiose normale
(à gauche) chez *Arabidopsis thaliana* contiennent chacune 5 chromosomes.
À droite : répartition chez le mutant *mer3*

Chapitre 5. L'enrichissement des génomes au cours de l'évolution

I. Des mécanismes se produisant lors de la reproduction sexuée

A. Les crossing-over inégaux créent des familles multigéniques

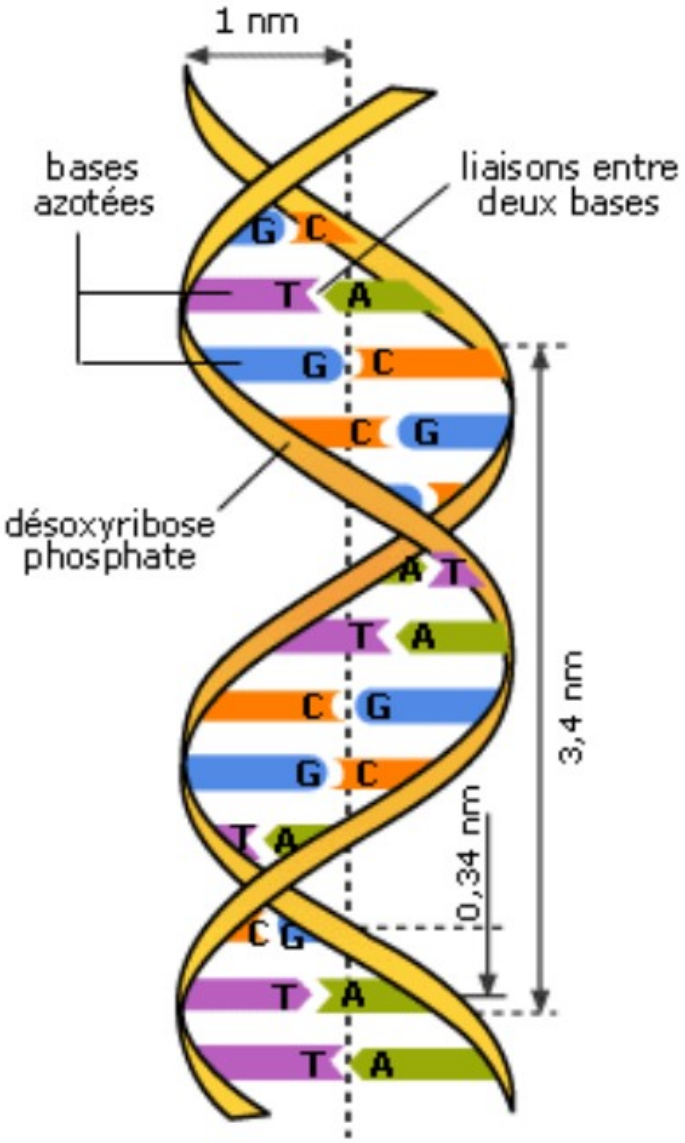
B. La polyploïdisation

II. Des mécanismes indépendants de la reproduction sexuée

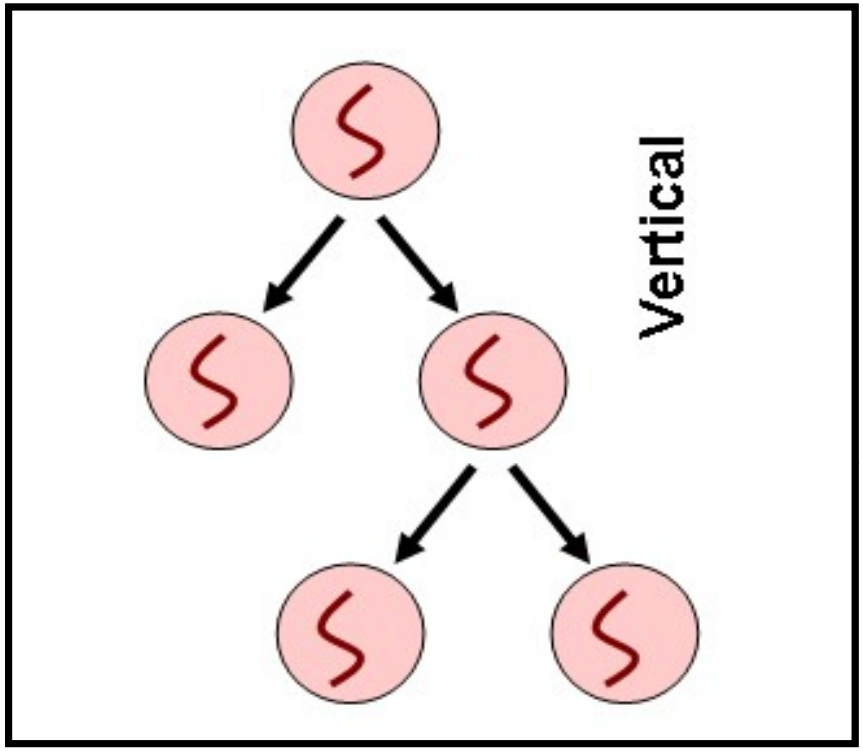
A – Les transferts horizontaux de gènes

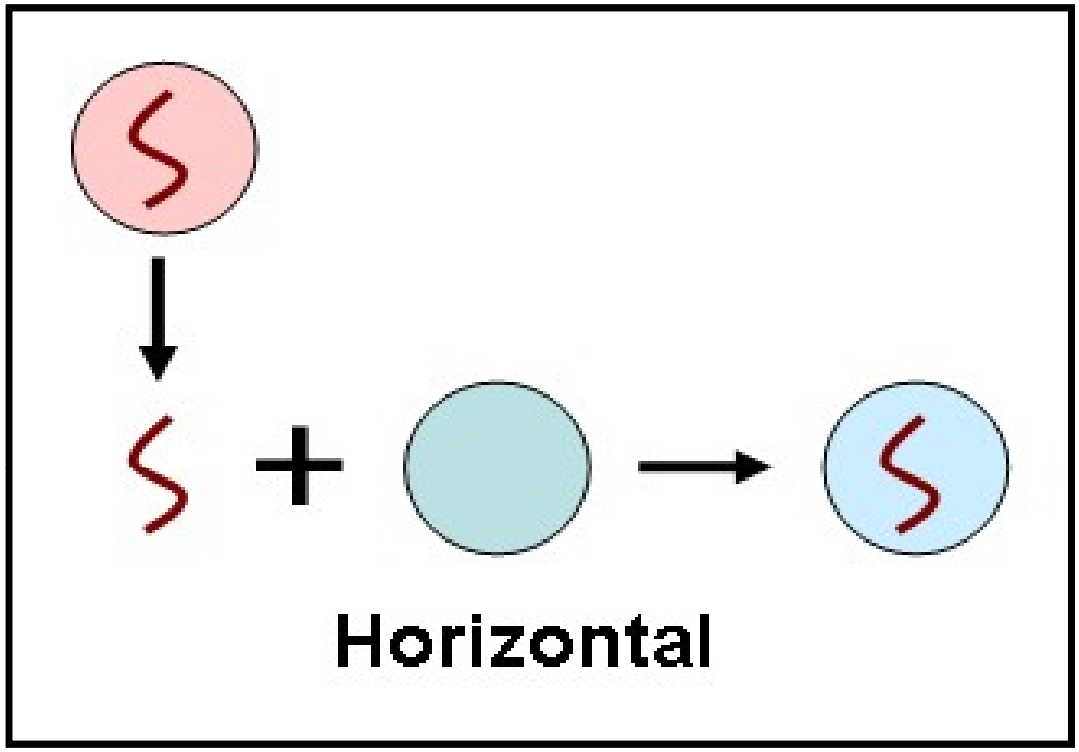
B – Les endosymbioses

Structure de la molécule d'ADN



Transfert vertical versus transfert horizontal



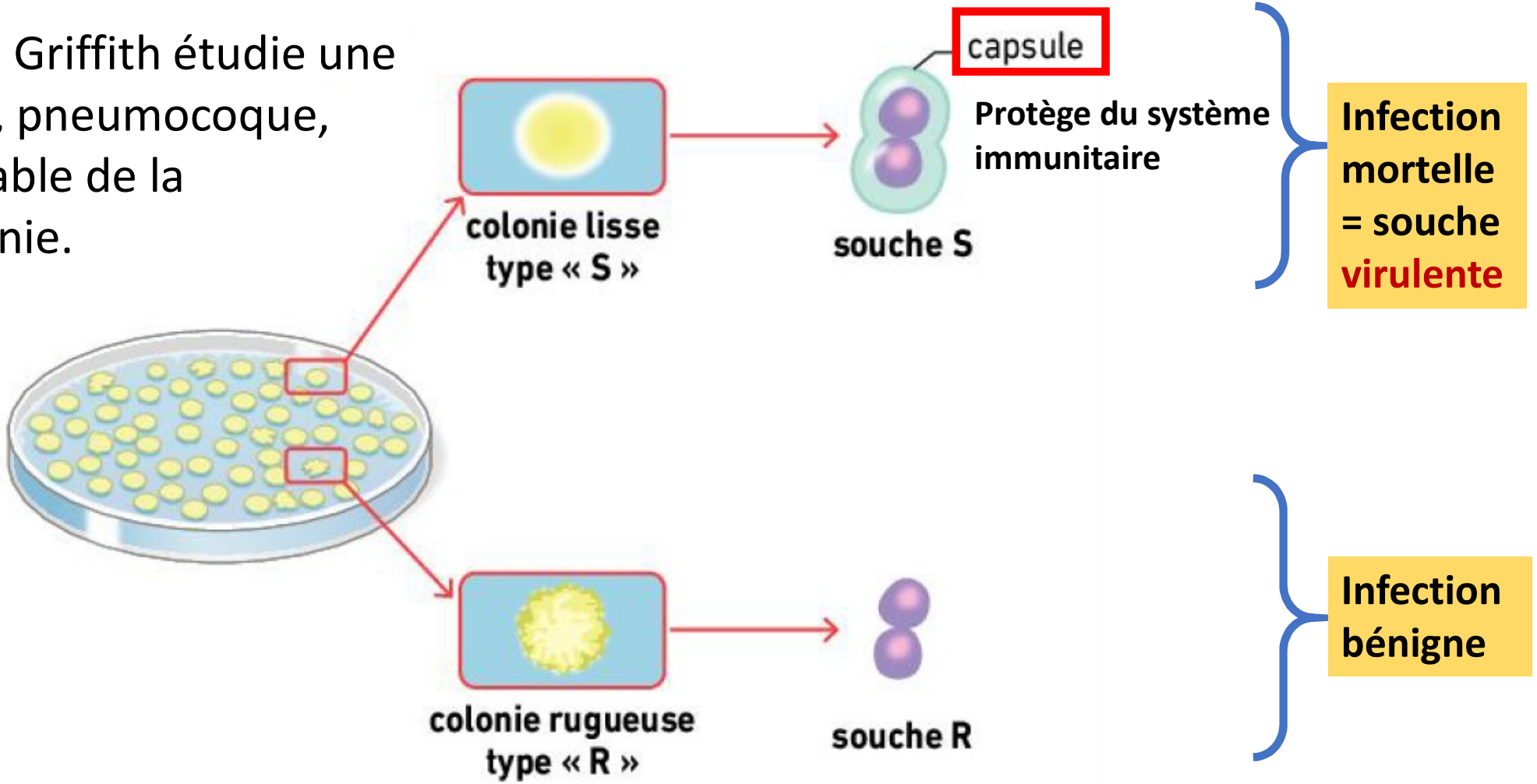


Reproduction sexuée et asexuée
(mitose / méiose + fécondation)

Transformation
Transduction
Conjugaison

Transfert horizontal : mise en évidence (Histoire des Sciences)

En 1928, Griffith étudie une bactérie, pneumocoque, responsable de la pneumonie.

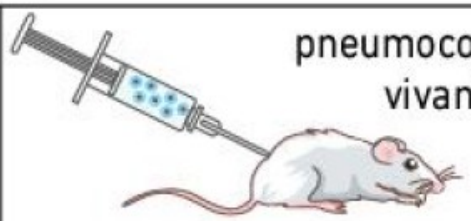


A Deux souches bactériennes génétiquement différentes.

[bordas]

Transfert horizontal : mise en évidence (Histoire des Sciences)

Expériences de Griffith

	Expériences		Résultats	Dans le sang de la souris
1	souche **S**	pneumocoques **S** vivants 	mort de la souris	nombreux pneumocoques **S** vivants

4 : Transfert de la virulence (capacité à fabriquer la capsule) **de la souche morte à la vivante**

[bordas]

Transfert horizontal : mise en évidence (Histoire des Sciences)

Expériences d'Avery, McLeod, McCarty

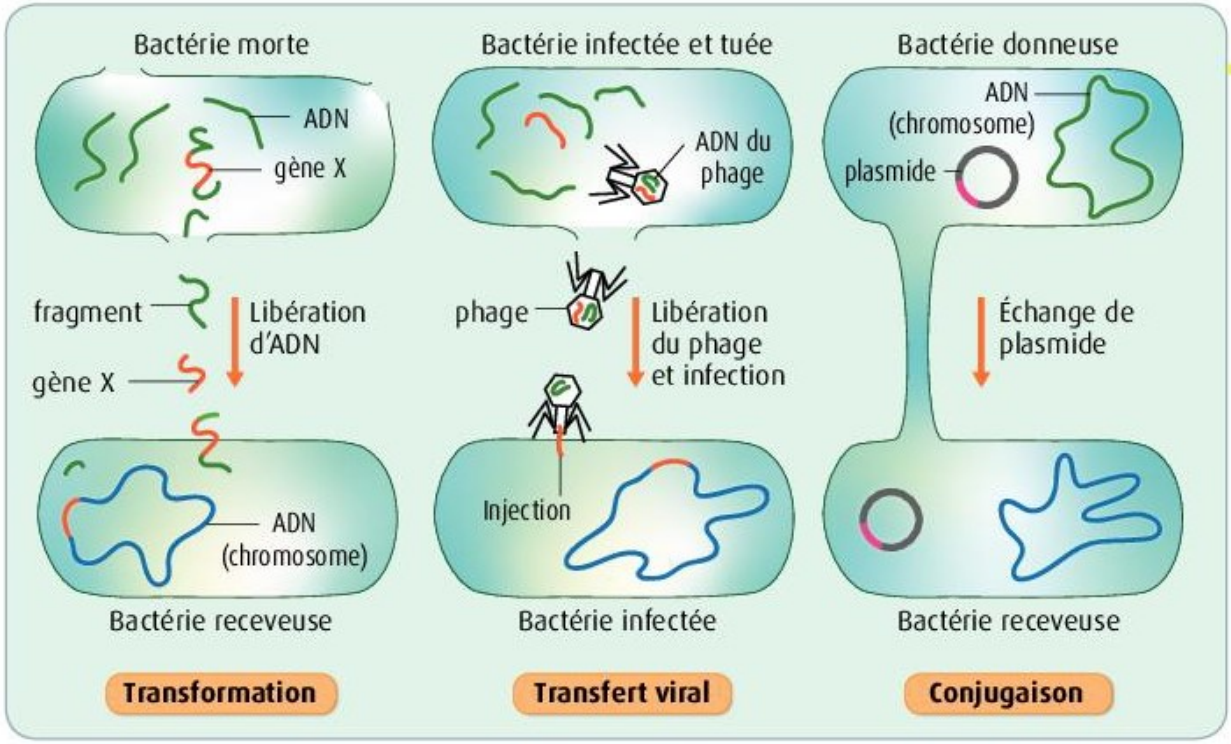
	Expériences		Résultats	
5	+ protéase	**S** tués, sans protéines + **R** vivants	mort de la souris	nombreux pneumocoques **S** vivants

5 : Ce transfert n'est pas de nature protéique

6 : C'est l'ADN de la souche S qui est récupérée par la souche R

[bordas]

Les différents types de transfert horizontal



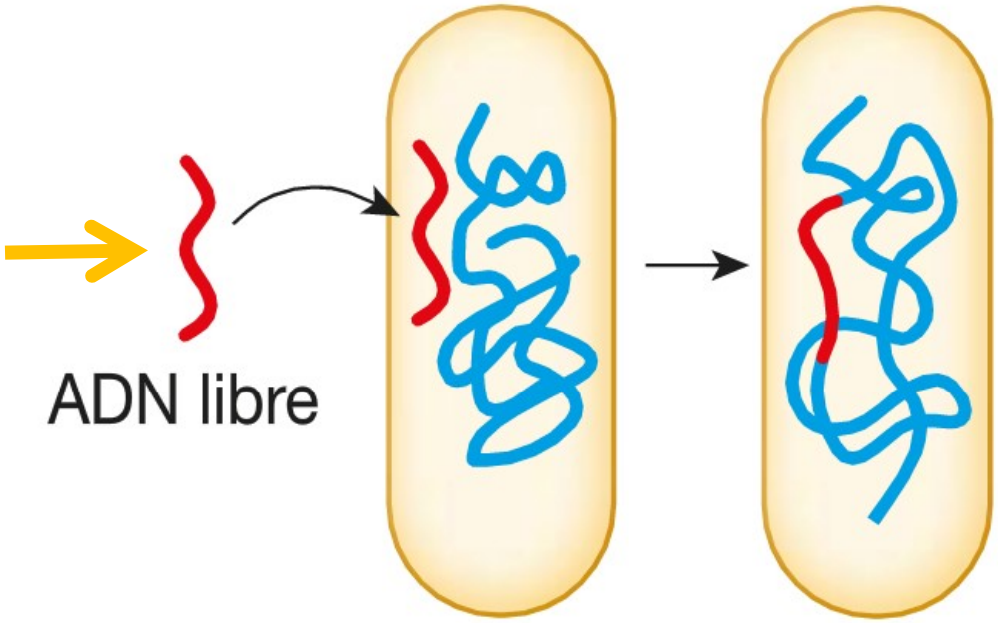
3 Les modalités de transferts de gènes chez les bactéries.
La transformation est le mécanisme responsable des observations de Griffith. La transduction implique les virus de bactéries, ou phages, qui se multiplient dans une bactérie donneuse qu'ils finissent par tuer. Certains bactériophages peuvent incorporer des fragments de génome bactérien à leur propre génome. La conjugaison implique l'échange de petites molécules d'ADN circulaire appelées plasmides, qui sont distinctes du chromosome bactérien. On estime que plus de 80 % des génomes bactériens sont hérités de transferts horizontaux, principalement entre bactéries vivant dans les mêmes milieux.

transduction

[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : transformation

Cellule mortes de l'environnement



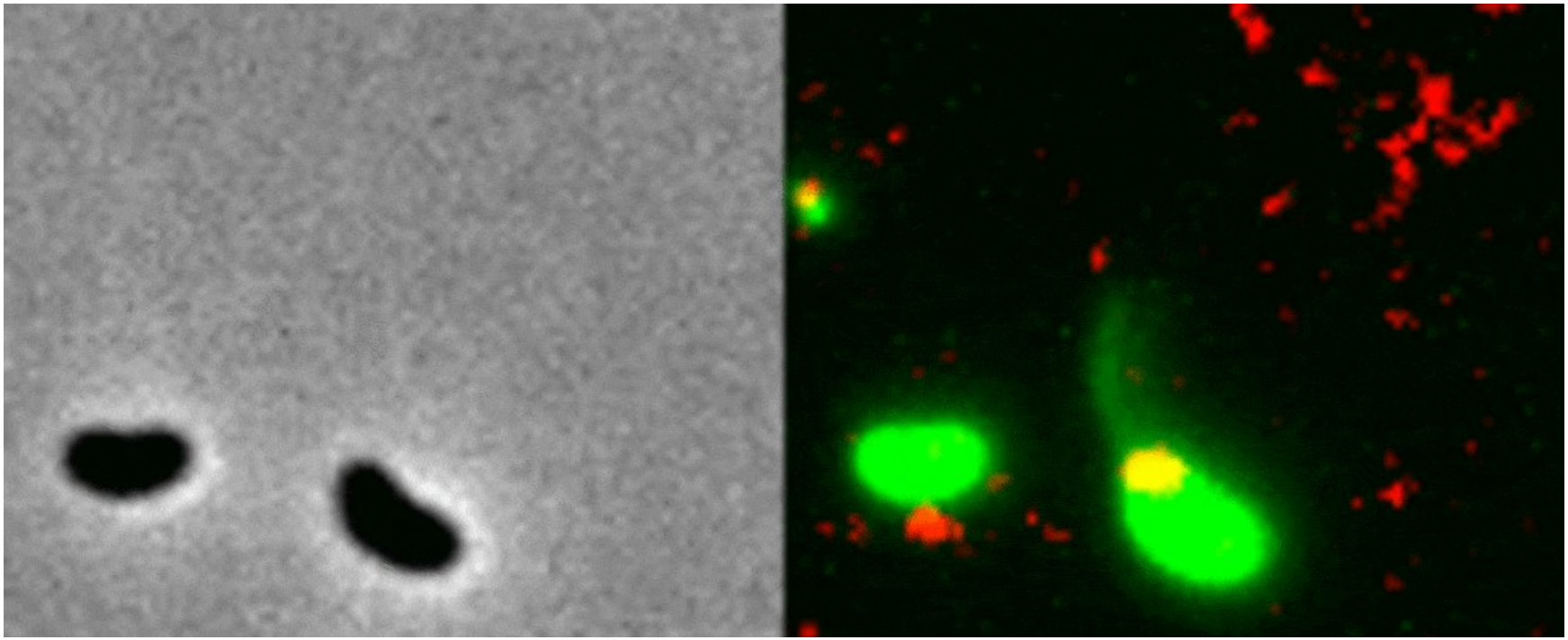
L'ADN libre passe dans la cellule et est intégré à l'ADN cellulaire.

Voir TP

[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : « transformation active »

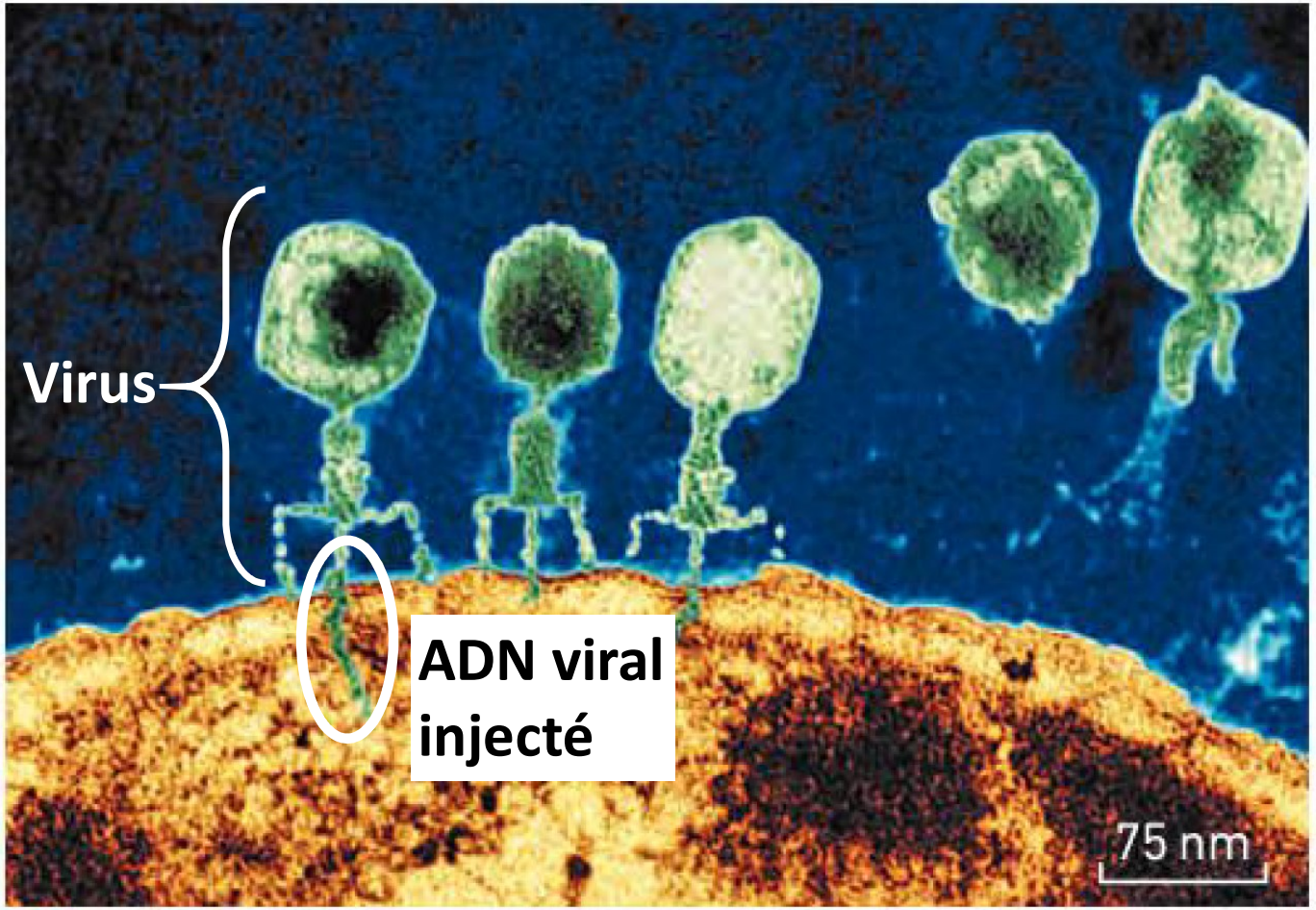
Une équipe de microbiologistes américains de l'université de l'Indiana a observé, pour la première fois en direct, un de ces mécanismes chez *Vibrio cholerae*, la bactérie responsable de la maladie du choléra. Le pathogène a projeté l'un de ses appendices dans le milieu environnant afin « d'harponner » un morceau d'ADN dans le but de l'intégrer à son génome !



⚠ HORS PROGRAMME

[Courtney K. Ellison & al.]

Les différents types de transfert horizontal : la transduction

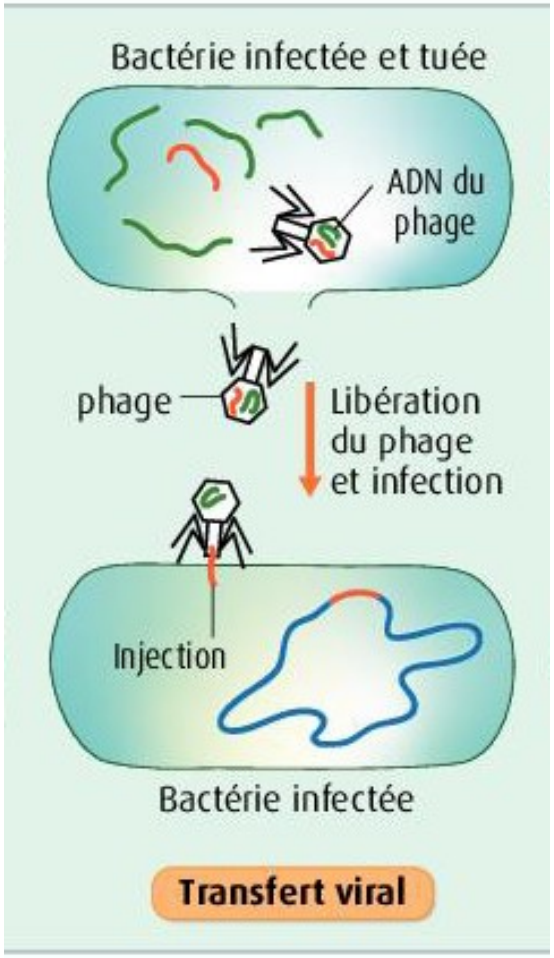


C Virus (bactériophages, en vert) injectant leur ADN dans une bactérie (MET*).

[bordas]

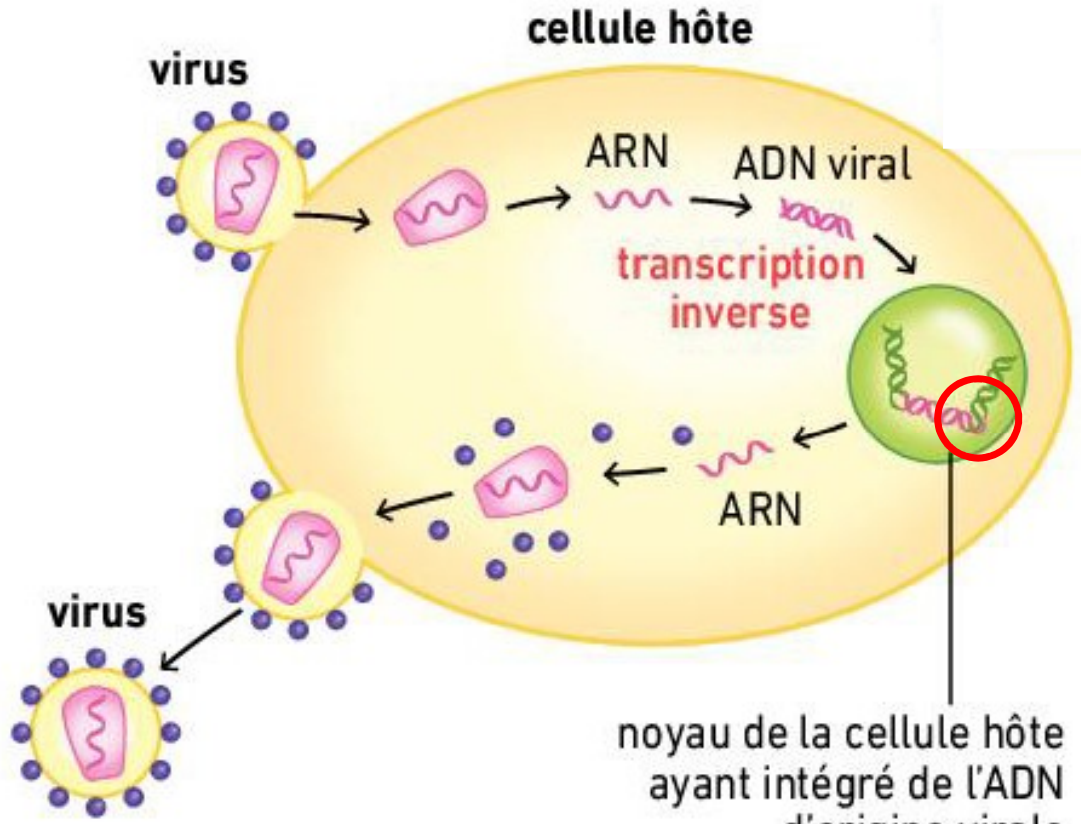
Les différents types de transfert horizontal : la transduction

transduction



[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : la transduction



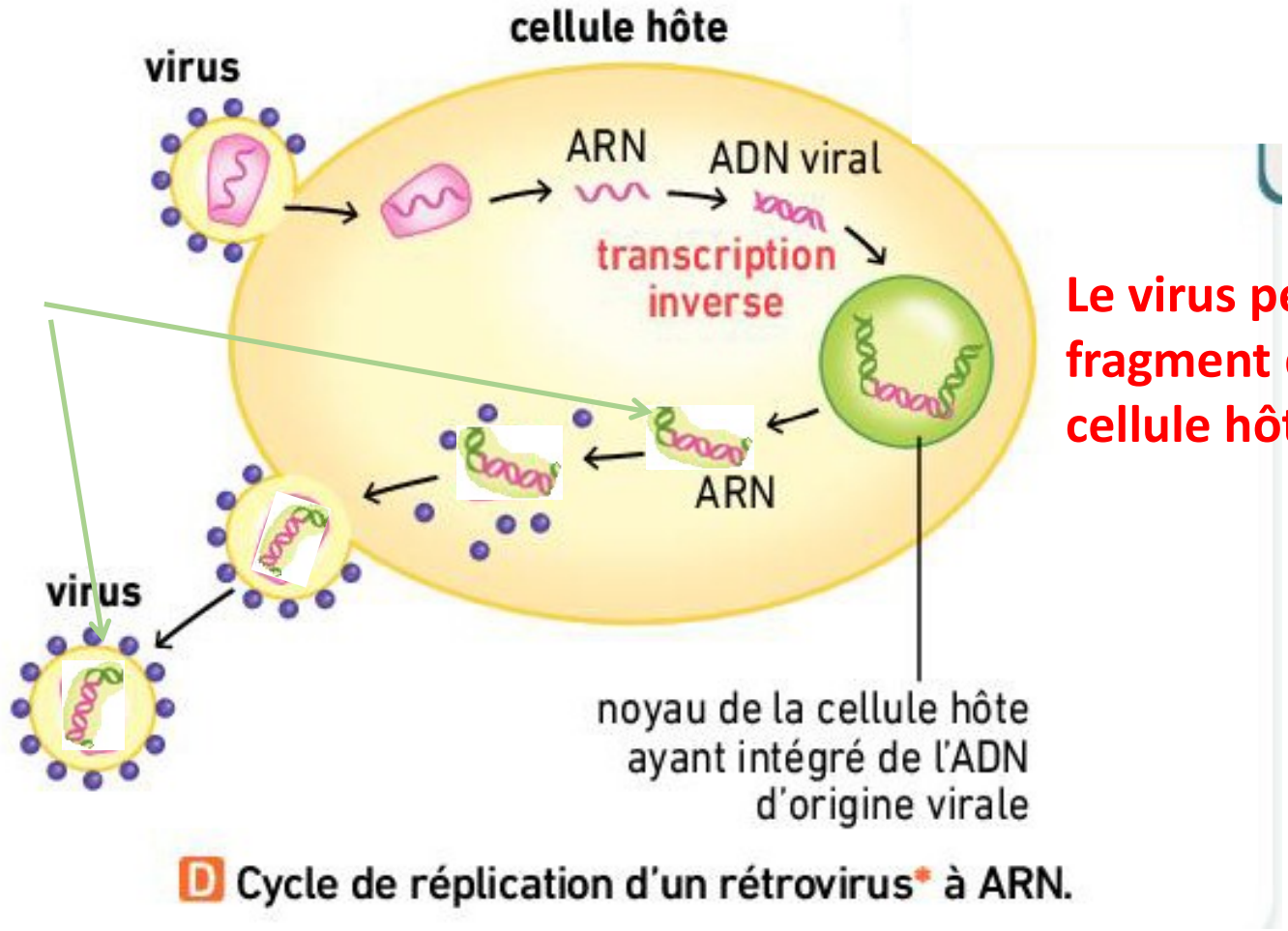
D Cycle de réplication d'un rétrovirus* à ARN.

Une séquence génétique virale peut être intégrée définitivement au génome de la cellule hôte

[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : la transduction

Fragment d'ADN de la cellule hôte



D Cycle de réplication d'un rétrovirus* à ARN.

Le virus peut intégrer un fragment d'ADN de la cellule hôte

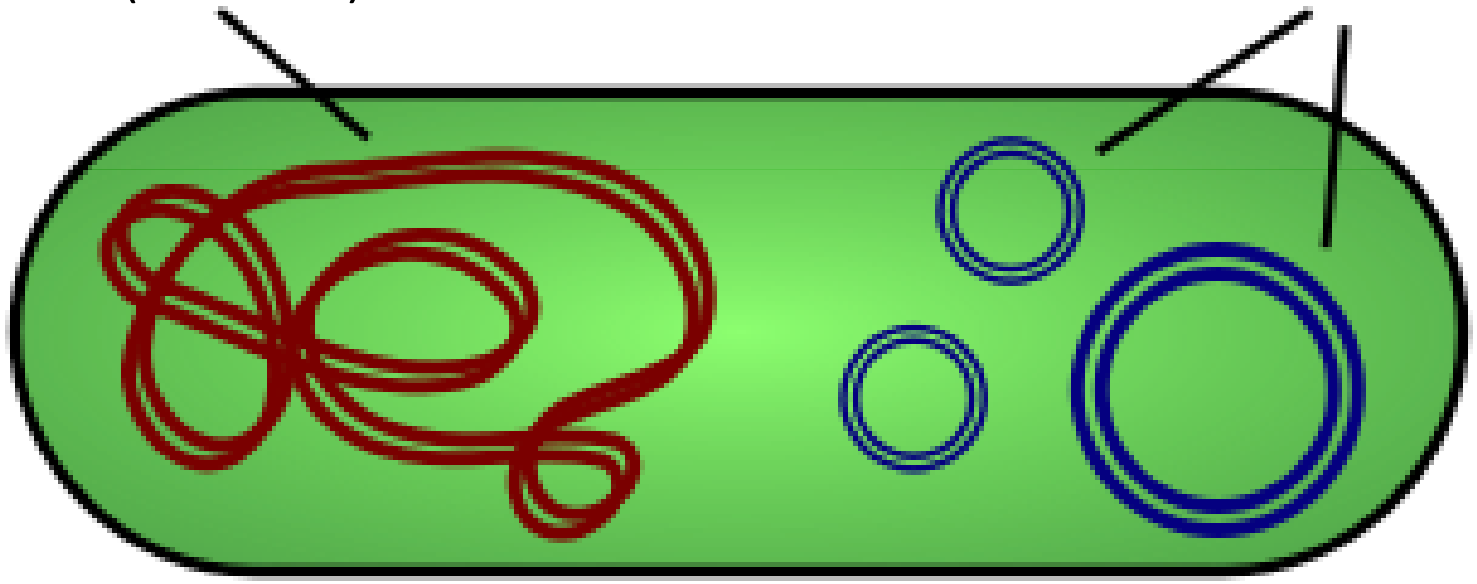
[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : la conjugaison

Chromosome bactérien
(circulaire)

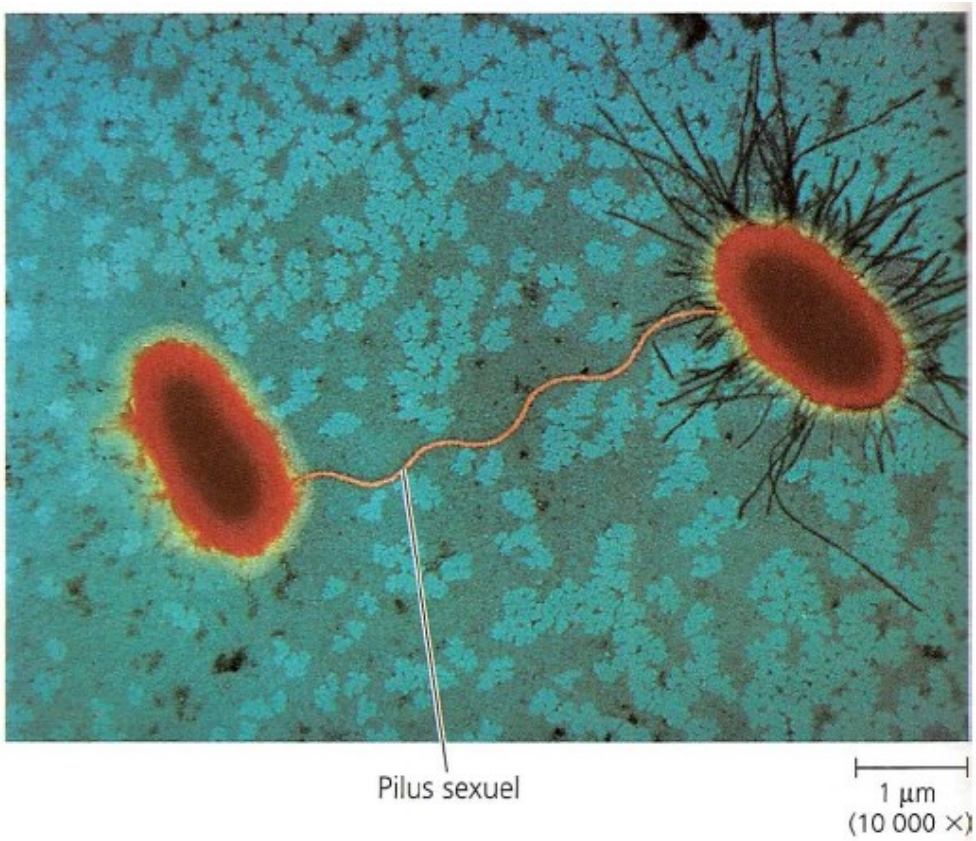
Plasmides

- ADN circulaire
- Gènes **dis**pensables
- ADN se répliquant indépendamment du chromosome



OGANISATION DU GENOME BACTERIEN

Les différents types de transfert horizontal : la conjugaison



Croisement bactérien. La bactérie donneuse *E. coli*, située à droite, étend un pilus sexuel en direction de la bactérie receveuse et le fixe à elle. Les deux cellules sont ensuite tirées l'une vers l'autre. Un pont cytoplasmique peut désormais se former entre elles. Grâce à ce tunnel, la bactérie donneuse transfère de l'ADN à la bactérie receveuse. Ce mécanisme de transfert de l'ADN est appelé conjugaison (cliché pris au MET et coloré).

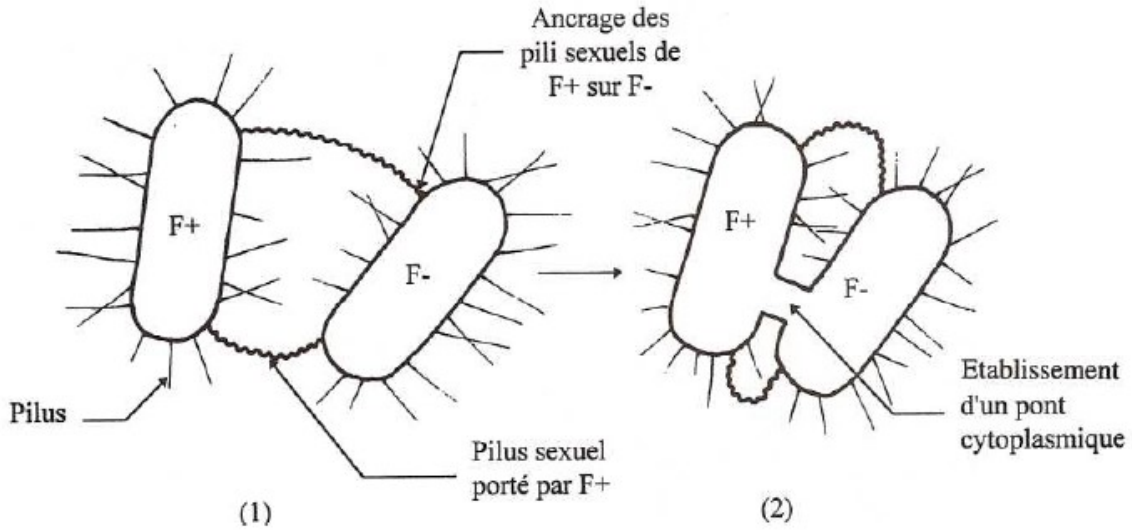
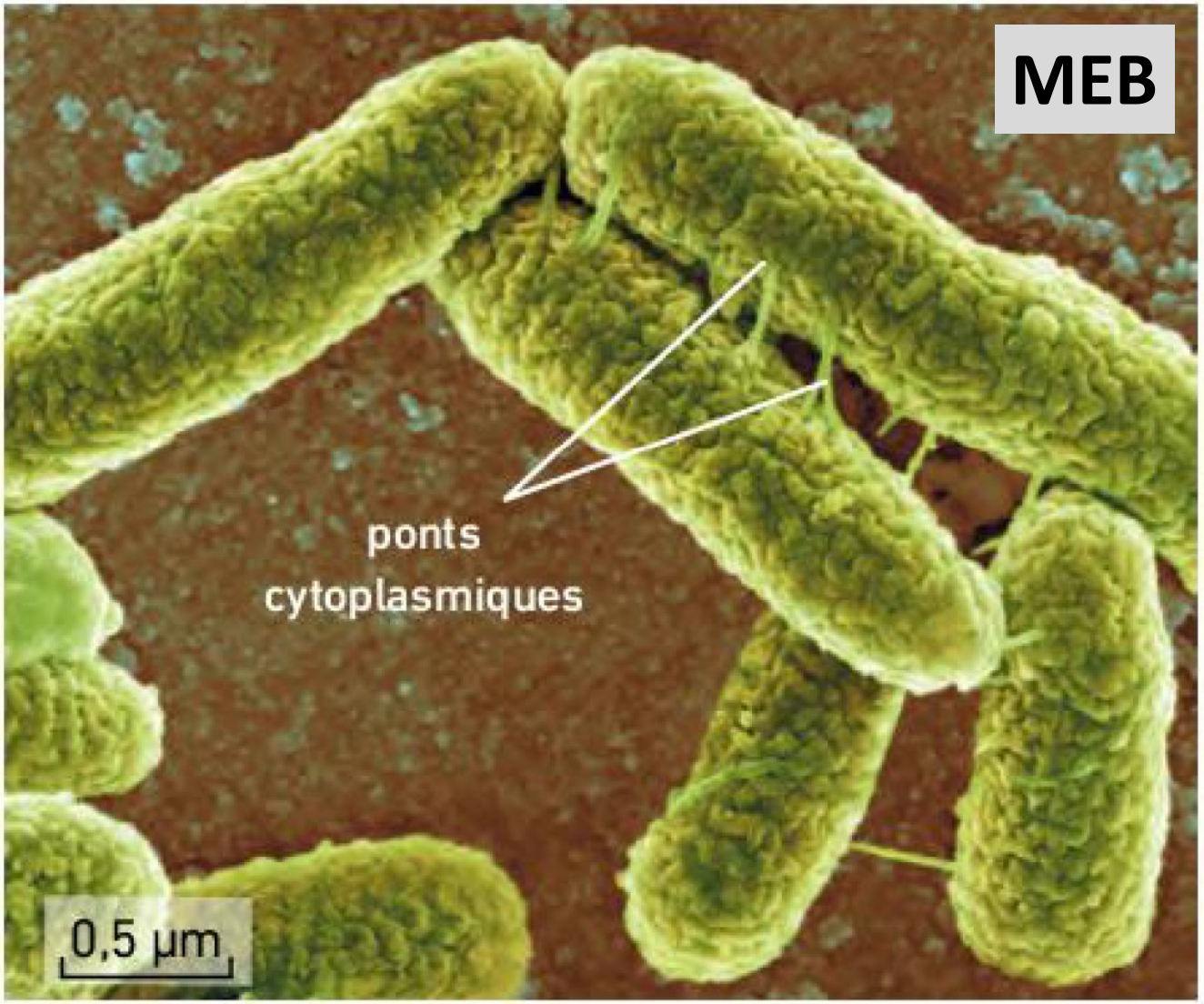


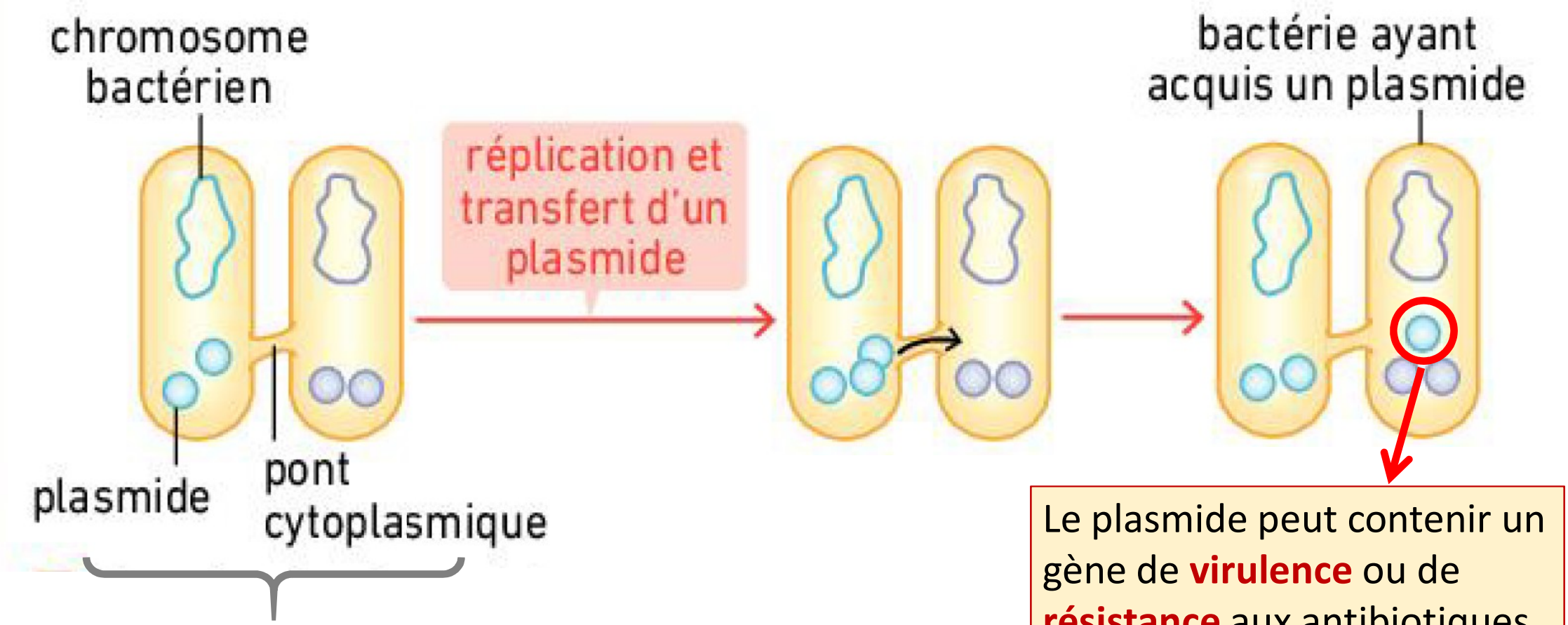
FIGURE 24. Établissement d'un pont cytoplasmique lors de la conjugaison.
D'après POULIZAC (1999).

Les différents types de transfert horizontal : la conjugaison



[bordas]

Les différents types de transfert horizontal : la conjugaison



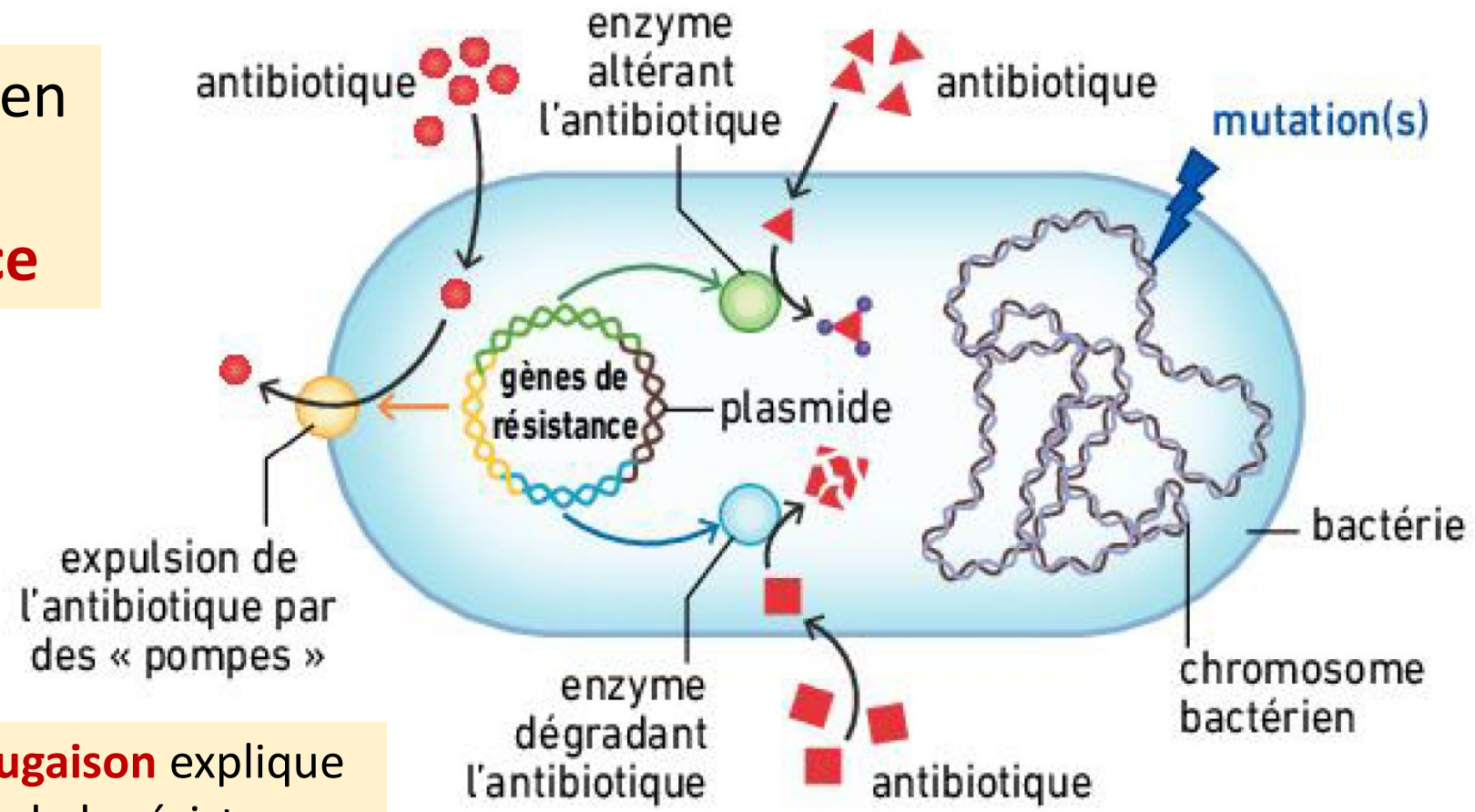
Bactéries de même espèce ou d'espèces ≠

Le plasmide peut contenir un gène de **virulence** ou de **résistance** aux antibiotiques

[bordas]

Conséquences des transferts horizontaux fréquents : résistance aux antibiotiques

25 000 morts/an en Europe dues à l'**antibiorésistance**



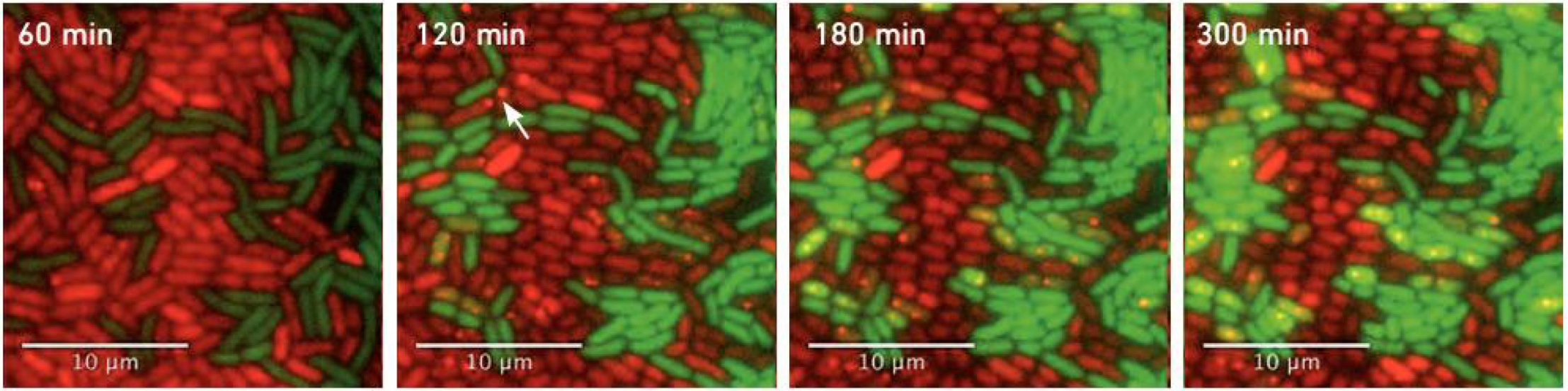
Mutations rares… la **conjugaison** explique 80% des cas d'acquisition de la résistance

A Les divers mécanismes de résistance bactérienne aux antibiotiques.

[Bordas]

Conséquences des transferts horizontaux fréquents : résistance aux antibiotiques

Résistance à la tétracycline = pompe qui expulse l'antibiotique en dehors de la cellule

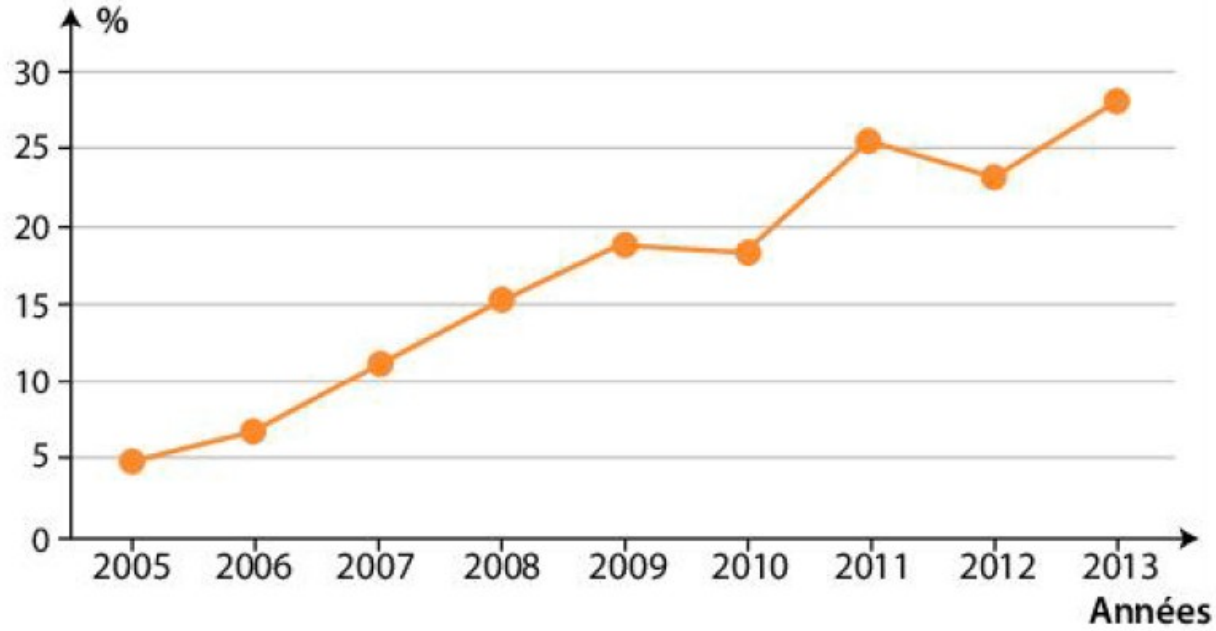


B Populations de bactéries sensibles (en rouge) ou résistantes (en vert) à la tétracycline. Observation par microscopie en fluorescence de cellules vivantes. (La flèche indique un plasmide).

Remarque : peu de divisions cellulaires ici car « surpopulation » du milieu

[Bordas]

Conséquences des transferts horizontaux fréquents : résistance aux antibiotiques



*Céphalosporine de 3e génération : antibiotique inhibiteur de la synthèse de la paroi bactérienne utilisé depuis les années 1980-1990 *Source : https://www.antibio-responsable.fr/bacteries/klebsiella*

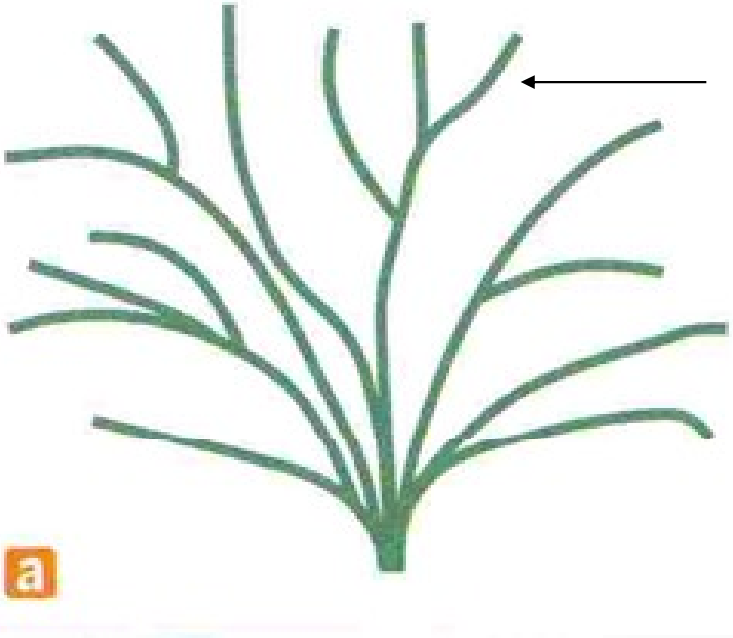
b Évolution de la résistance de *Klebsiella pneumoniae* à la céphalosporine de 3e génération* en France

L'antibiorésistance acquise par les transferts horizontaux de gènes est favorisée au sein de communautés bactériennes complexes, les biofilms. Dans la nature, les biofilms se développent sur tous types de surfaces (cathéter, surface des tuyaux d'assainissement de l'eau…). Ils sont composés d'un mélange compact de microorganismes, souvent reliés par des pili, de polysaccharides, de fibres adhésives, et d'ADN extracellulaire en très grande quantité.

c Les biofilms

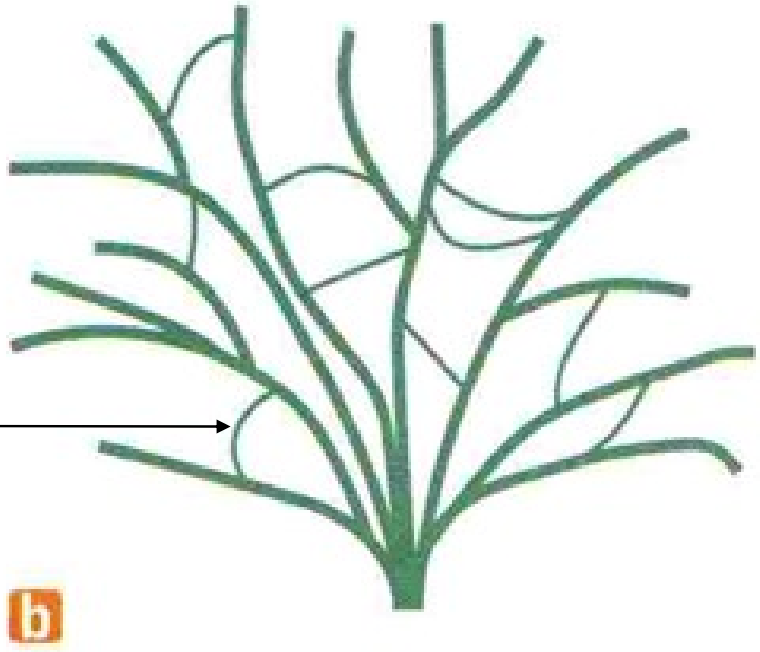
[hachette]

Un réseau phylogénétique complexe



Arbre phylogénétique de transferts verticaux

Réseau phylogénétique des transferts verticaux et horizontaux

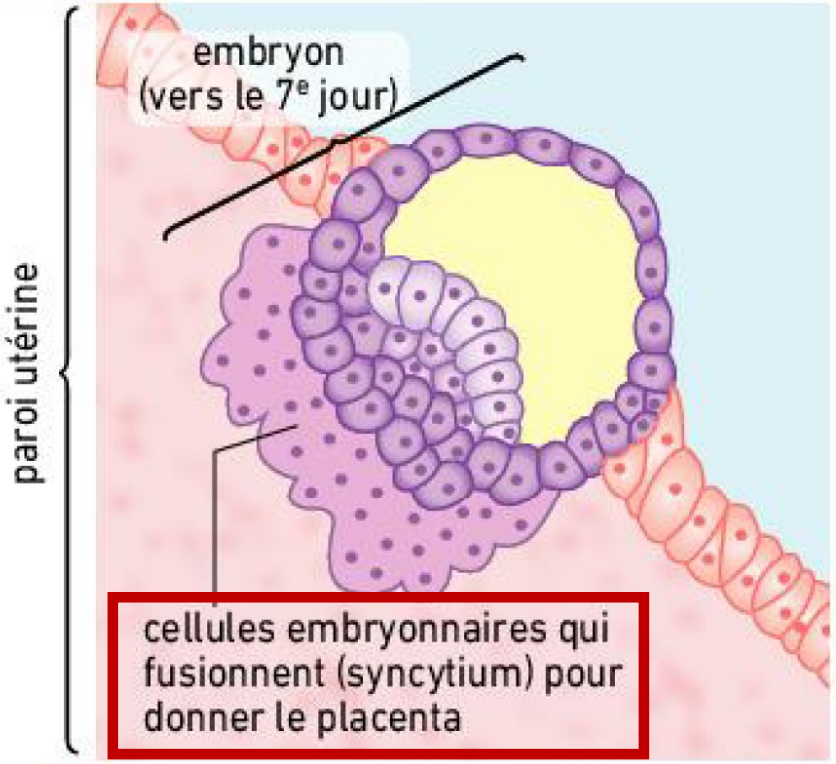


Importance des transferts horizontaux

Estimation de la quantité d'ADN viral présent dans l'ADN cellulaire

- 10% chez les humains
- 50% dans le génome de maïs

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta



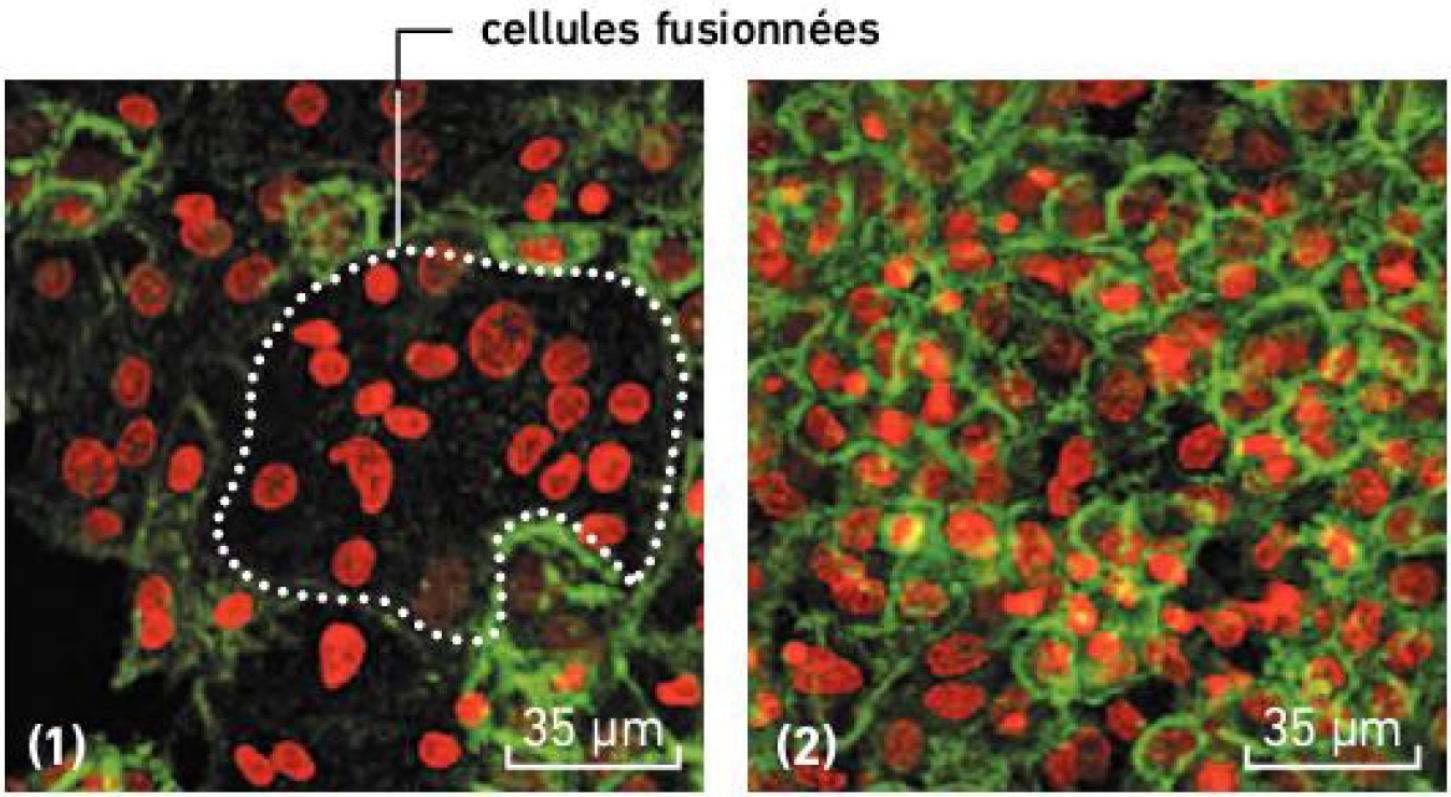
A L'implantation de l'embryon et le début de formation du placenta.

[bordas]

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

- **Vert** = Anticorps anti-membrane plasmique

- **Rouge** = marquage des noyaux



B Cellules embryonnaires humaines à l'origine du placenta après 72 heures de culture.

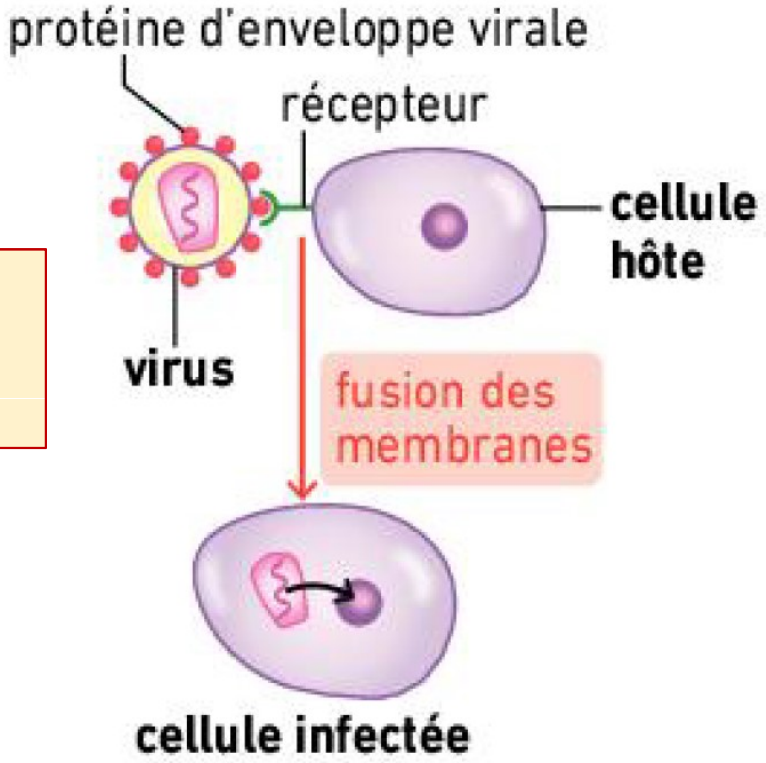
Syncitium possible grâce à un gène (syncitine) exprimé dans l'organe

l'expression du gène codant l'une des syncytines.

[bordas]

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

Infection virale



Mise en place d'un placenta

C Une interaction moléculaire à l'origine d'une fusion membranaire.

[bordas]

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

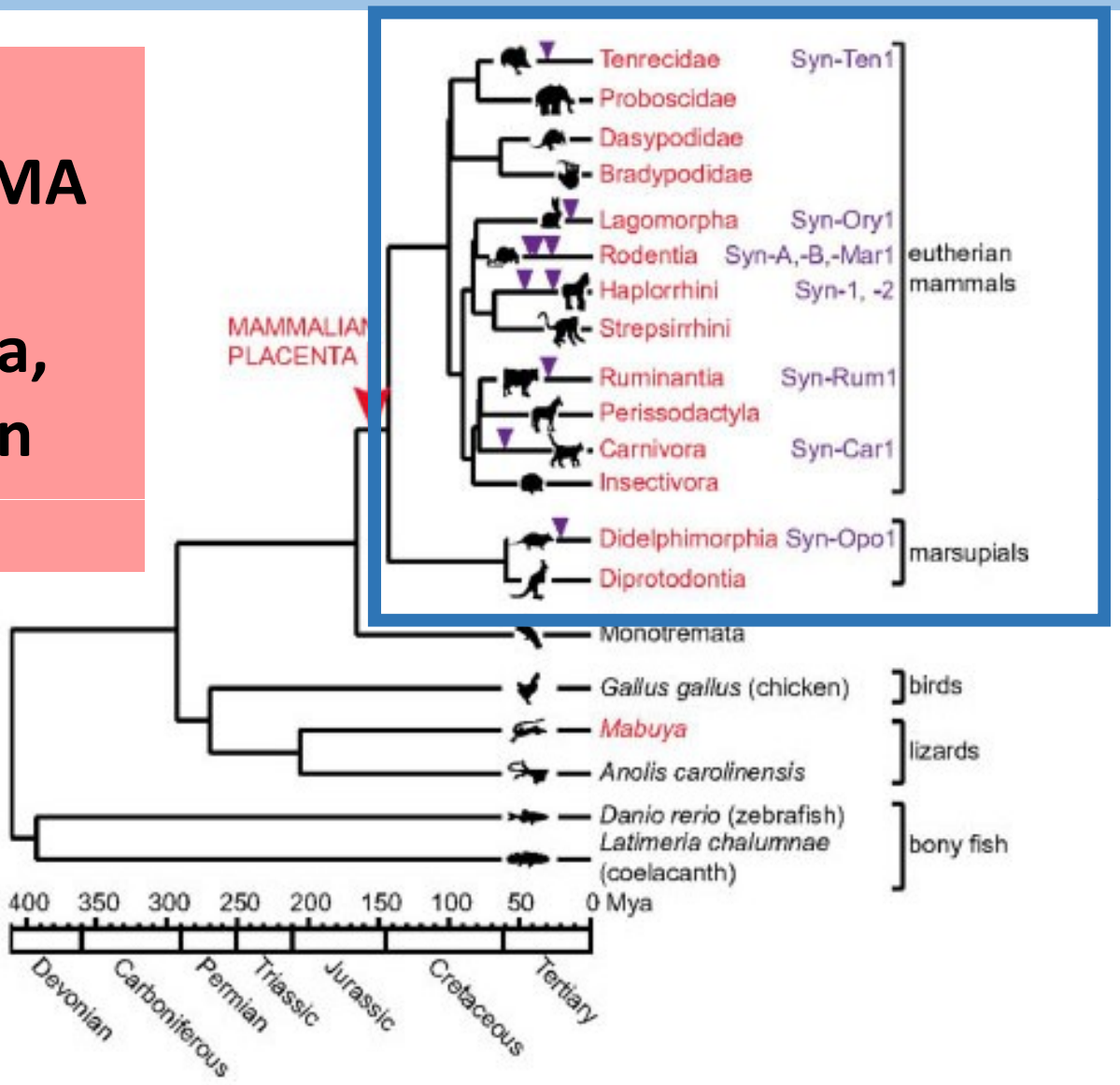
Comparaison avec alignement

	135					140					145					150					155					160					165
Syncytine humaine	Ser	Gln	Leu	Thr	Arg	Val	His	Gly	Thr	Ser	Ser	Pro	Tyr	Lys	Gly	Leu	Asp	Leu	Ser	Lys	Leu	His	Glu	Thr	Leu	Arg	Thr	His	Thr	Arg	Leu	Val
Protéine virale MSRV	-	-	-	-	-	Gly-		Ser-		Pro-	-	-	-	-	-	Val-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

D Comparaison de la séquence d'acides aminés de la syncitine 1 humaine et d'une protéine d'enveloppe d'un rétrovirus.

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

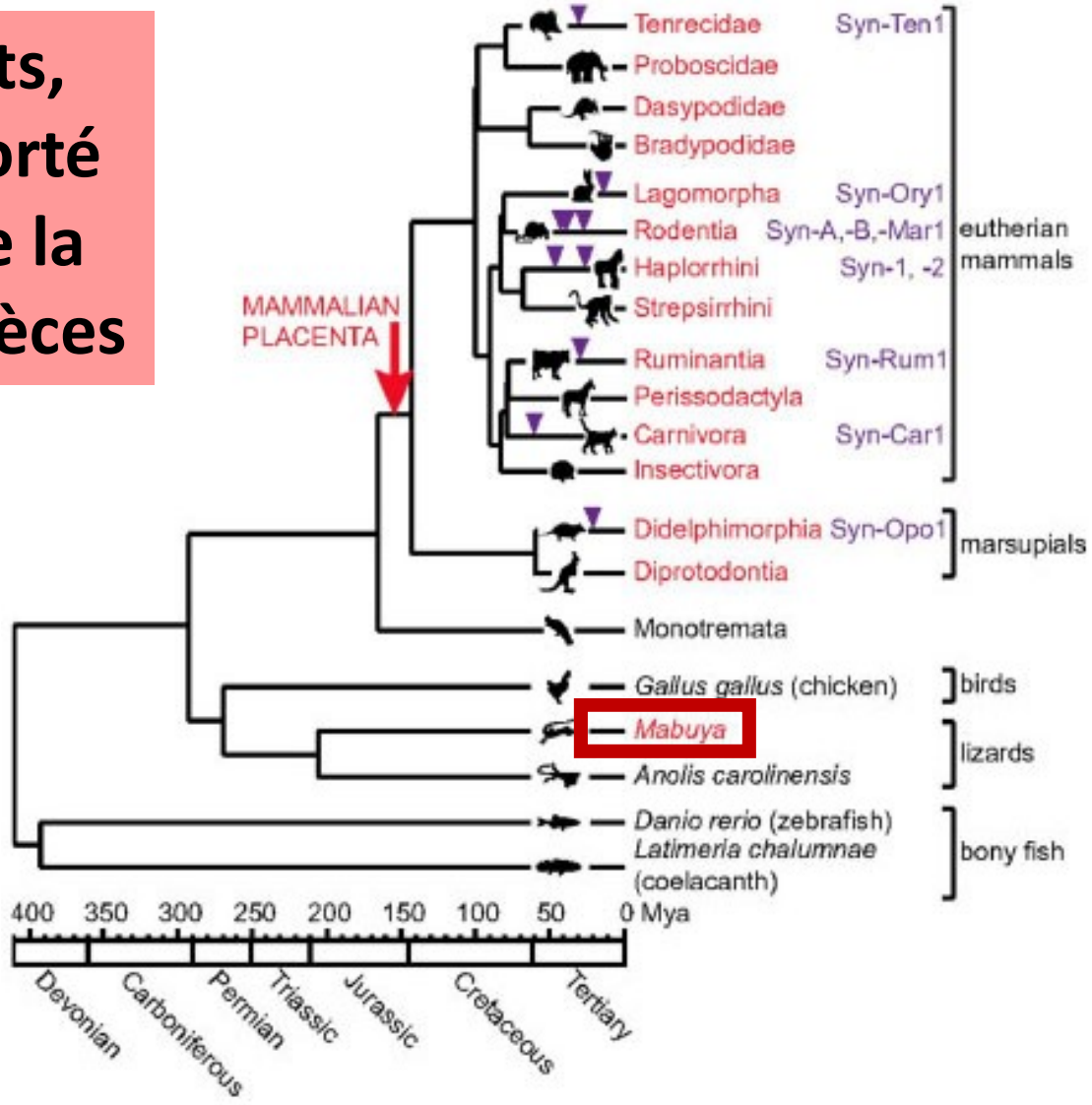
- un premier transfert horizontal il y a ≈150 MA est à l'origine d'une innovation, le placenta, chez l'ancêtre commun des mammifères



[Cornelis 2017]

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

De nouveaux transferts, plus récents, ont apporté de nouveaux gènes de la syncitine dans les espèces



[Cornelis 2017]

Transfert horizontal et évolution : l'exemple du placenta

Convergence évolutive !

1 **Un mabuya.** Ce lézard des Andes possède un placenta, c'est-à-dire une structure qui permet les échanges avec l'embryon et la mère lors de la gestation. Son placenta a une structure proche de celle du placenta des mammifères placentaires (voir doc. 4). En 2017, des chercheurs ont découvert que ce lézard possède un gène qui code une protéine appelée syncytine.

Mise en évidence de transferts horizontaux chez les animaux : résistance au cyanure

Cyanure d'hydrogène = - produit par certaines plantes
- poison repoussant les ravageurs
- sélection d'un **gène de résistance** CAS : des allèles sont capables de dégrader le cyanure chez certains ravageurs chez les **papillons** et **bactéries**

Laurier cerise

[hachette]

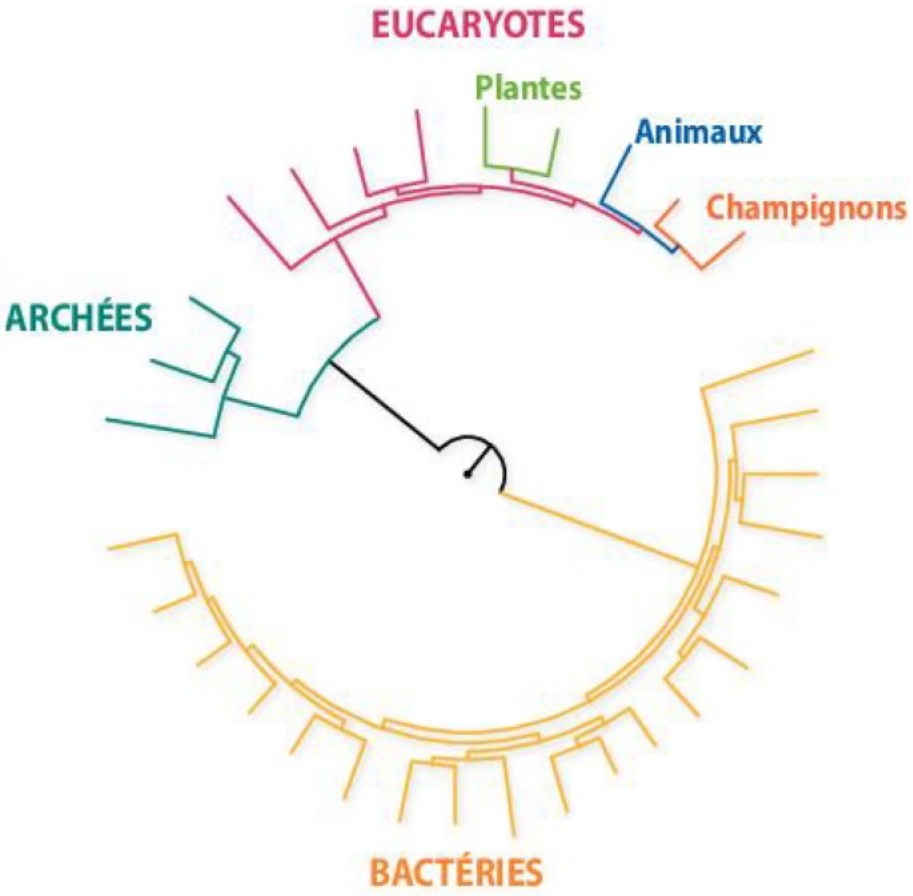
Mise en évidence de transferts horizontaux chez les animaux : résistance au cyanure

Arbre phylogénétique basé sur de nombreux gènes

-> robuste / fiable

Les bactéries sont un groupe monophylétique : elles sont toutes issues d'un ancêtre commun exclusif.

Il en est de même pour le taxon des papillons.

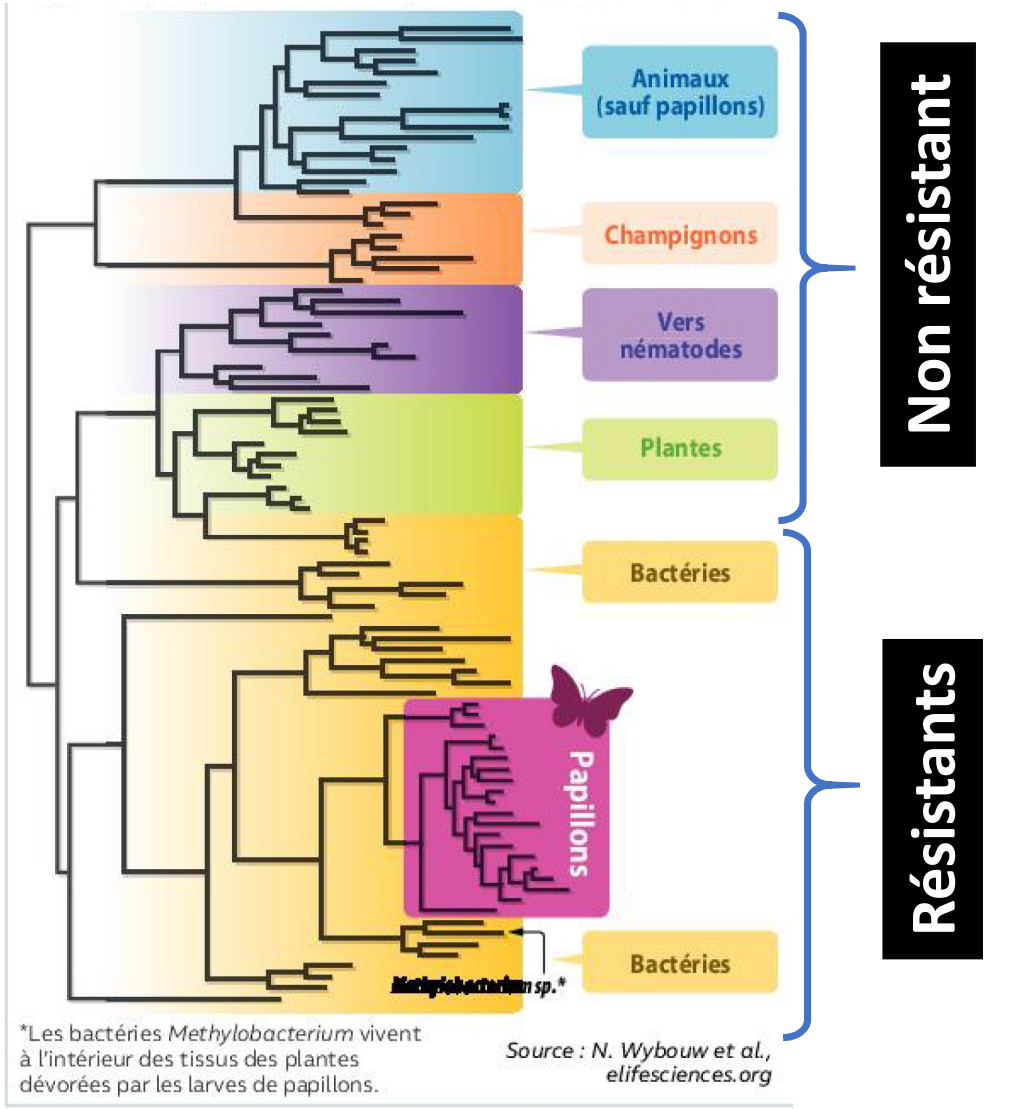


a Arbre phylogénétique du vivant construit à partir d'études multiples

Seules quelques lignées d'eucaryotes sont précisées. [hachette]

Mise en évidence de transferts horizontaux chez les animaux : résistance au cyanure

Arbre phylogénétique basé uniquement sur **le gène de résistance CAS** uniquement



b Arbre phylogénétique construit à partir du gène CAS [hachette]

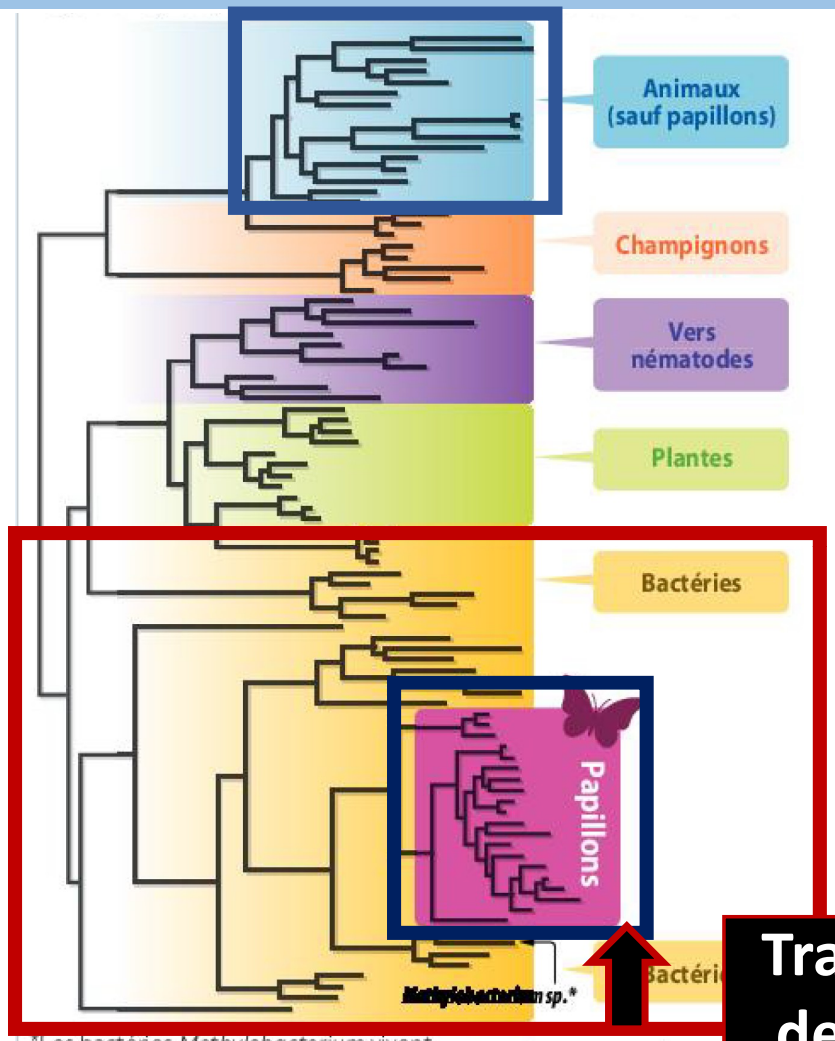
Mise en évidence de transferts horizontaux chez les animaux : résistance au cyanure

Arbre phylogénétique basé uniquement sur **le gène de résistance CAS** uniquement

La CAS des papillons se regroupe avec les bactéries et non avec les autres animaux

Arbres phylogénétiques contradictoires

→ Transfert de gène des bactéries vers les papillons



b Arbre phylogénétique construit à partir du gène CAS [hachette]

Mise en évidence de transferts horizontaux chez les animaux : résistance au cyanure

Une partie de la séquence de l'enzyme CAS de plusieurs êtres vivants est alignée à l'aide du logiciel MUSCLE (voir tutoriel dans les ressources numériques). Chaque acide aminé est représenté par une lettre différente. Une même couleur correspond à une même propriété chimique de l'acide aminé. Les numéros indiquent la position de la séquence étudiée dans la protéine.
Le logiciel MUSCLE permet également de construire l'arbre de parenté à partir de ces séquences.

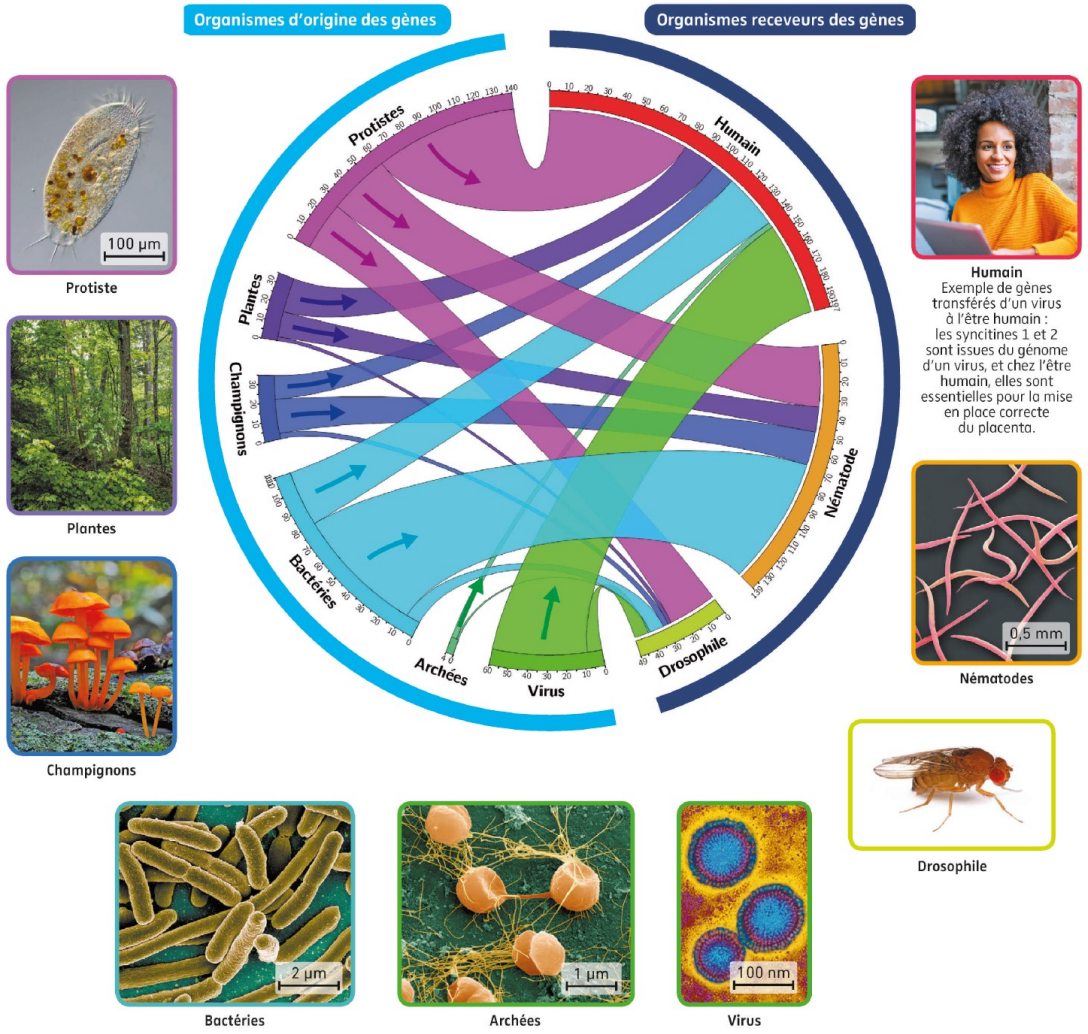
Animal : *C.elegans*	VKDR	EPTSGNMG	ERRC	V---------Q	LNQF	PANPEAHYK
Plante : *Z.mays*	VKDR	EPTSGNMG	ERRV	V---------R	LQQF	PANVKVHYD
Plante : *G.max*	IKDR	EPTSGNMG	ERRV	V---------K	LQQF	PANTQVHFE
Plante : *A.thaliana*	IKDR	EPTSGNMG	ERRV	V---------K	CQQF	PANTQIHFD
Bactérie : *Methylobacterium*	VKDR	EMSSGNMG	QRAR	VTGADVAAAAE	VDQF	PEGVAIHRD
Bactérie : *M.radiotolerans*	VKDR	EMTSGNMG	QRAR	VTGADVDAAAD	VNQF	PECMRAHRE
Papillon : *P.xylostella*	LKDR	EITSGNQG	QRAL	VTFADVEVCEK	VNQF	PSNSLSHYK
Papillon : *D.plexippus*	-94- IKCR	-121- AITSGNQG	-153- QRAI	-178- VTLSDVKAAEE	-194- VNQF	-200- DMNSEAHYE

C Alignement des acides aminés de l'enzyme CAS chez des plantes, des vers nématodes, des bactéries, des papillons

[hachette]

Source : N. Wybouw et al., elifesciences.org

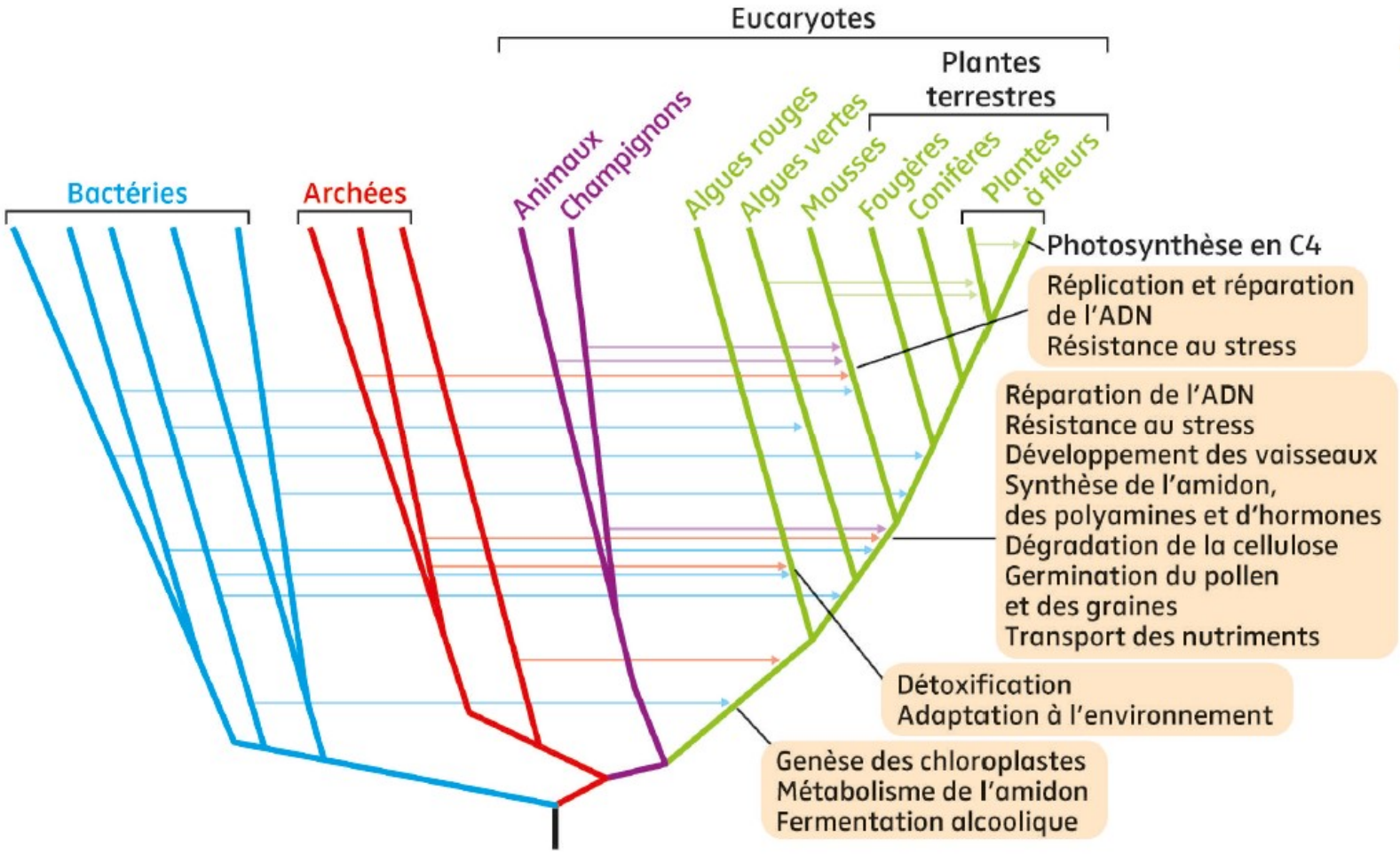
Les génomes, des véritables « patchwork »



1 **Nombre et origine des gènes transférés chez l'humain, le nématode et la drosophile.**
Les graduations indiquent les nombres de gènes identifiés à ce jour comme ayant fait l'objet d'un transfert horizontal.
La largeur des rubans est proportionnelle au nombre de gènes transférés.

[Nathan]

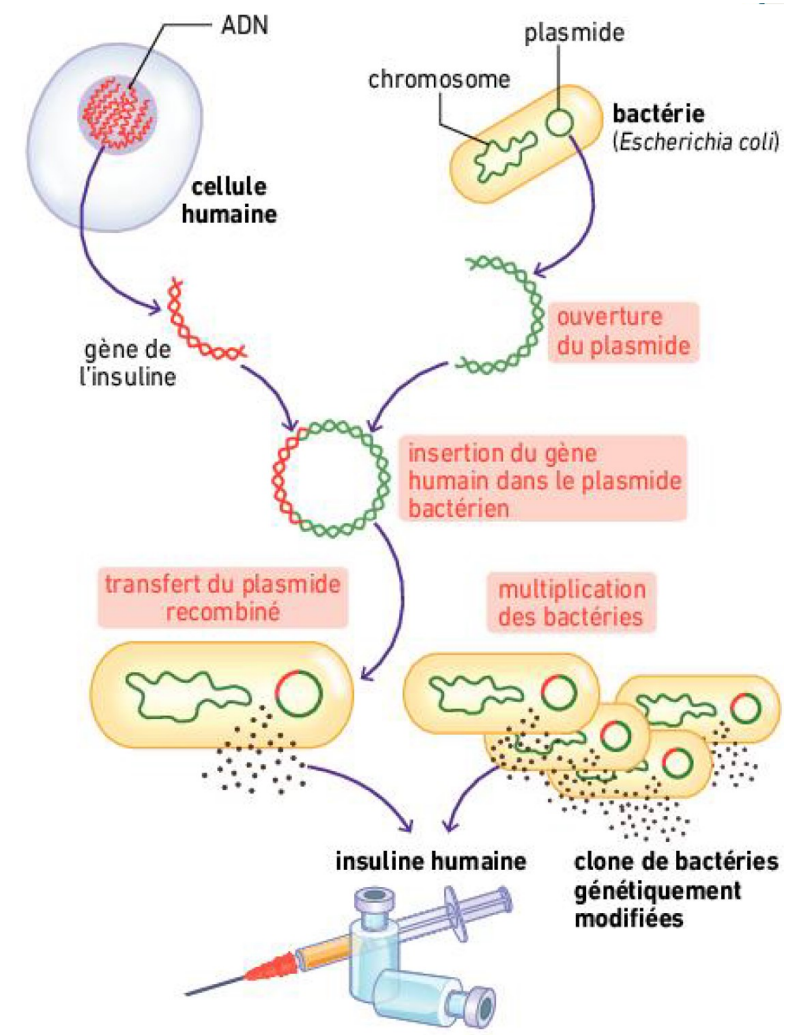
Les génomes, des véritables « patchwork »



2 Arbre phylogénétique simplifié du vivant présentant les transferts horizontaux de gènes dans la lignée des végétaux. Les traits verticaux représentent le déroulement au cours du temps des lignées aboutissant aux êtres vivants actuels situés en haut.
Les branchements représentent les ancêtres communs.
Les flèches horizontales indiquent des transferts de gènes entre lignées. Pour certains transferts, le gain de fonction est indiqué.

[Nathan]

Transferts horizontaux provoqués : la transgénèse



A Les étapes d'une transgénèse bactérienne pour produire de l'insuline humaine.

B Bioréacteurs contenant des bactéries génétiquement modifiées produisant des protéines humaines.

[Bordas

Transferts horizontaux provoqués : la transgénèse

Molécules produites par des bactéries génétiquement modifiées	insuline, hormone de croissance (somatotropine), interféron (cytokine), filgrastim (facteur de croissance des globules blancs)
Molécules produites par des levures génétiquement modifiées	insuline, antigène de surface du virus de l'hépatite B (pour vaccins), facteurs de coagulation, hydrocortisone (anti-inflammatoire), antipaludique (artémisinine), analgésiques (morphine, thébaïne)

C Molécules à usage thérapeutique fabriquées par génie génétique.

[Bordas

Chapitre 5. L'enrichissement des génomes au cours de l'évolution

I. Des mécanismes se produisant lors de la reproduction sexuée

A. Les crossing-over inégaux créent des familles multigéniques

B. La polyploïdisation

II. Des mécanismes indépendants de la reproduction sexuée

A – Les transferts horizontaux de gènes

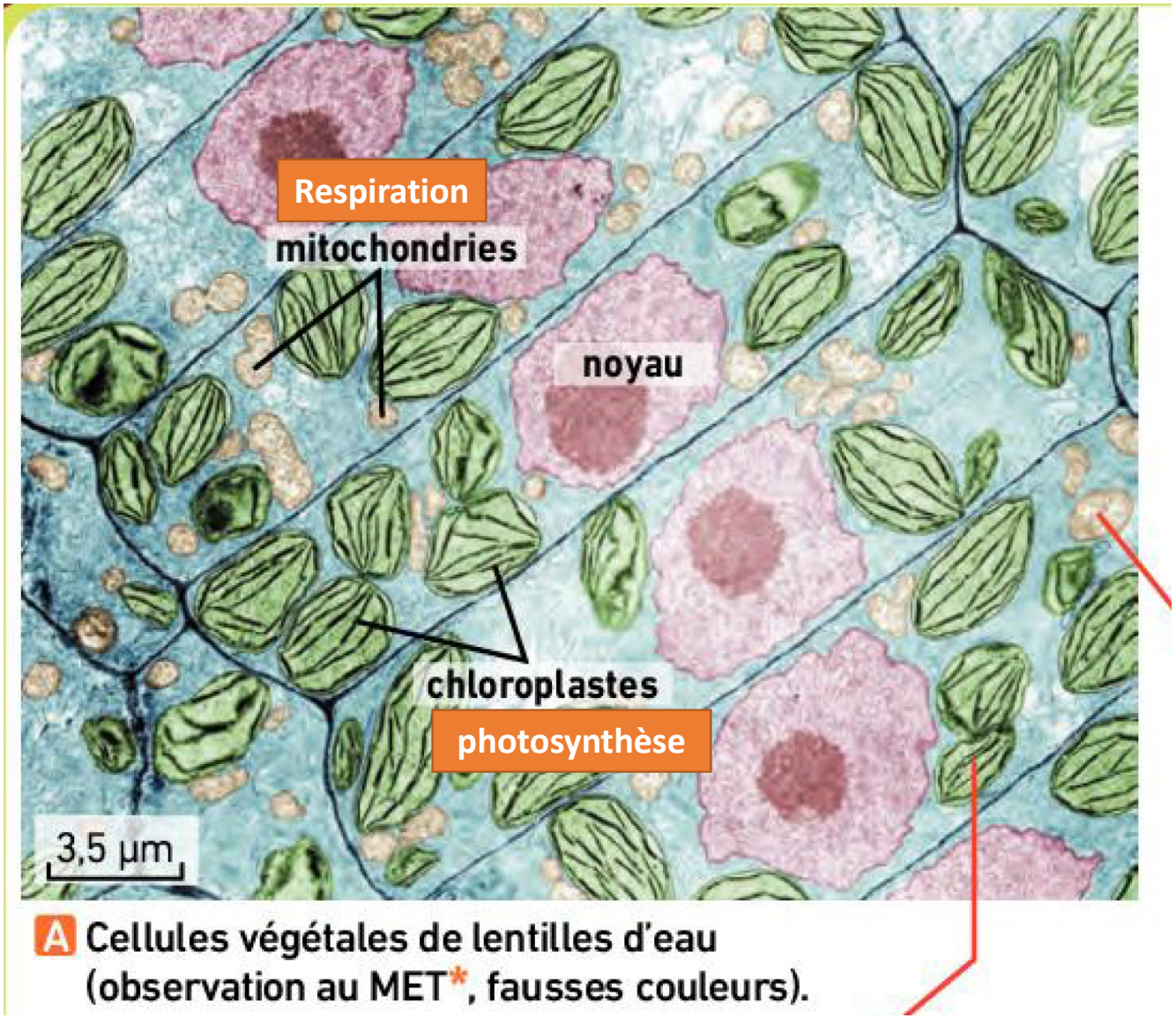
B – Les endosymbioses

Définir les symbioses

- La symbiose est une association de deux êtres vivants **durable** et à **bénéfices réciproques**.

- Elle est **source de diversification**.

La cellule eucaryote est compartimentée

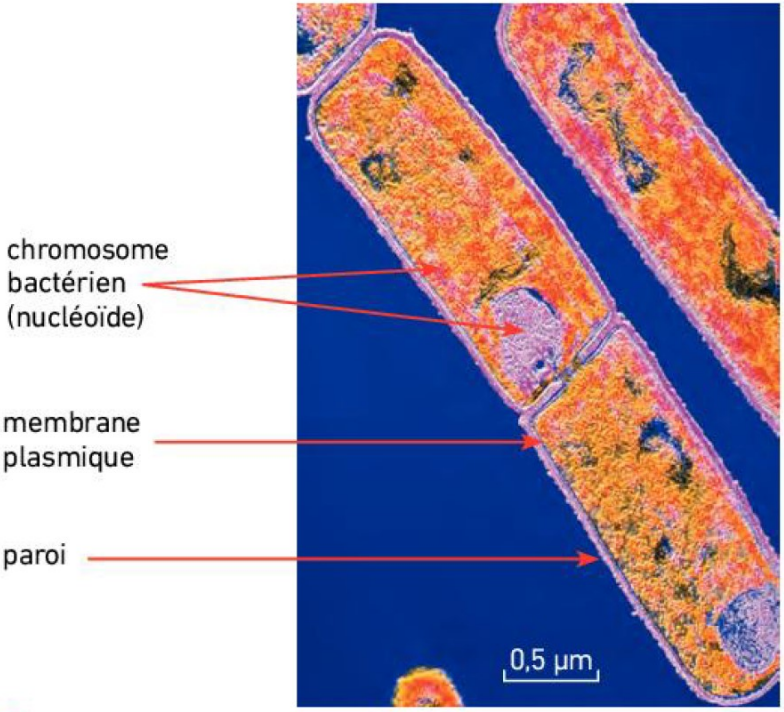


A Cellules végétales de lentilles d'eau (observation au MET*, fausses couleurs).

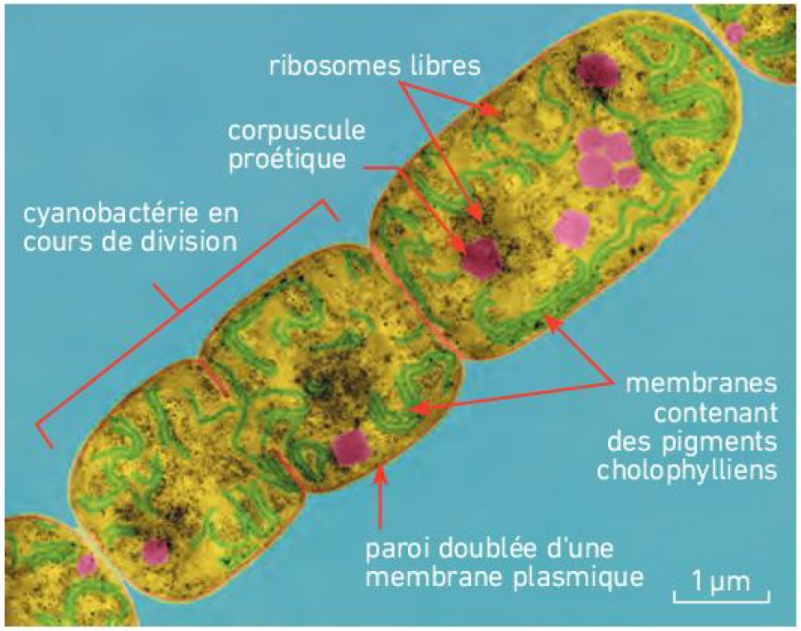
[bordas]

Rappels sur la cellule procaryote

La plupart des bactéries sont entourées d'une paroi chimiquement complexe, doublée intérieurement par une membrane plasmique entourant le cytoplasme et son contenu. Elles constituent des cellules non compartimentées, dépourvues de noyau : leur ADN est nu, organisé en un chromosome circulaire au contact direct du cytoplasme où se fait la synthèse protéique grâce aux ribosomes. Elles possèdent également des petites molécules d'ADN circulaires, les plasmides, qui se répliquent indépendamment du chromosome.
Leur reproduction se fait par simple division d'une cellule qui réplique son chromosome bactérien, s'allonge avant de se diviser en deux cellules filles dotées d'une membrane et d'une paroi.
Elles pratiquent des métabolismes variés : respiration, fermentations*, photosynthèse ou chimiosynthèse*.

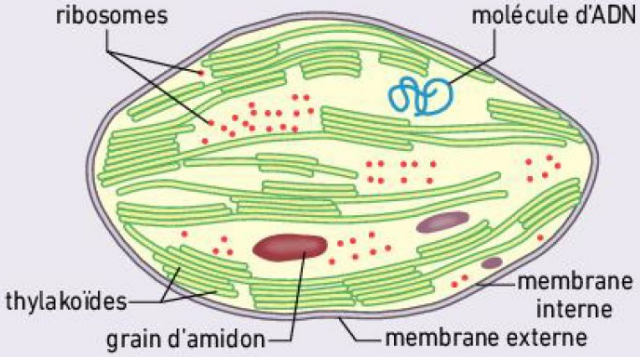


A Bactérie (*Bacillus subtilis*) en cours de division (MET).



B Cyanobactérie filamenteuse photosynthétique (*Nostoc*), observée au MET.

Un organite : le chloroplaste



- Taille : 1 à 10 µm.
- Limité par une double membrane.
- ADN sans protéines associées, formant un chromosome circulaire, en de nombreux exemplaires identiques, codant la synthèse de certaines protéines (d'autres sont codées par des gènes nucléaires) et d'ARN.
- Présence de compartiments en forme de sacs (les thylakoïdes) dont la membrane renferme des molécules permettant la photosynthèse.

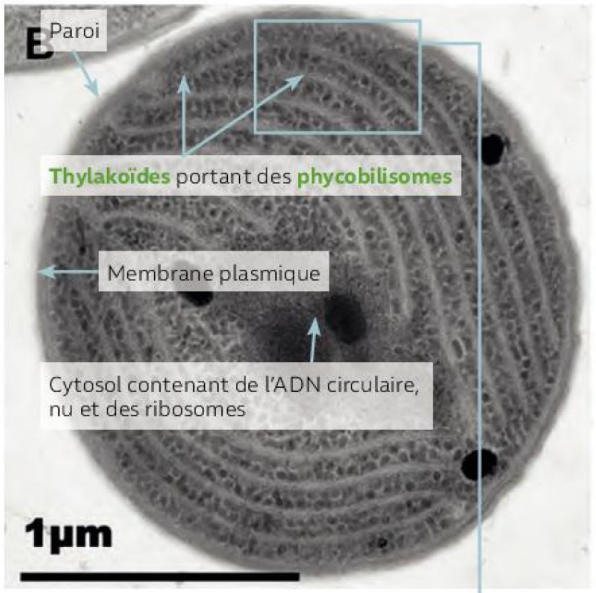
B Chloroplaste (observation au MET et caractéristiques).

Similitudes avec les bactéries

[bordas]

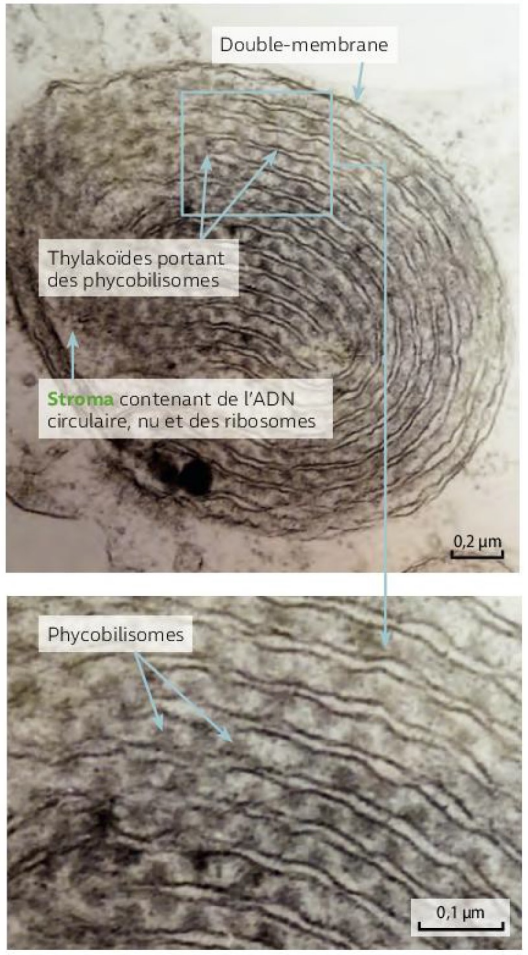
Comparaison de chloroplaste et cyanobactéries au MET

1 Cyanobactérie observée au microscope électronique à transmission



Source : D.G. Welkie, jb.asm.org, 2016

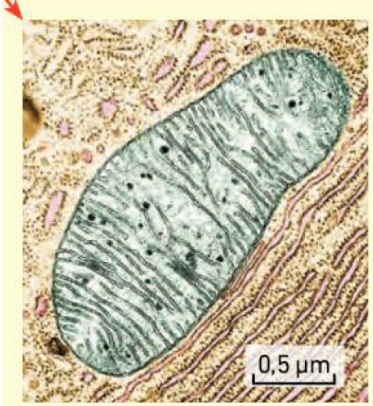
2 Chloroplaste d'algue rouge observé au microscope électronique à transmission

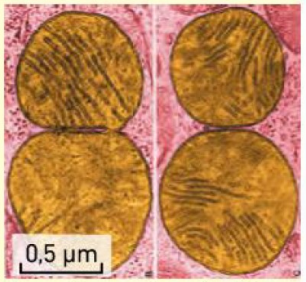


Source : © C. Lichtlé, www.snv.jussieu.fr

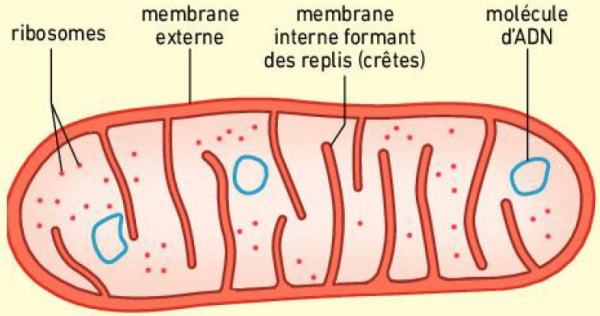
[hachette]

Un organite : la mitochondrie





Deux étapes de la division d'une mitochondrie.

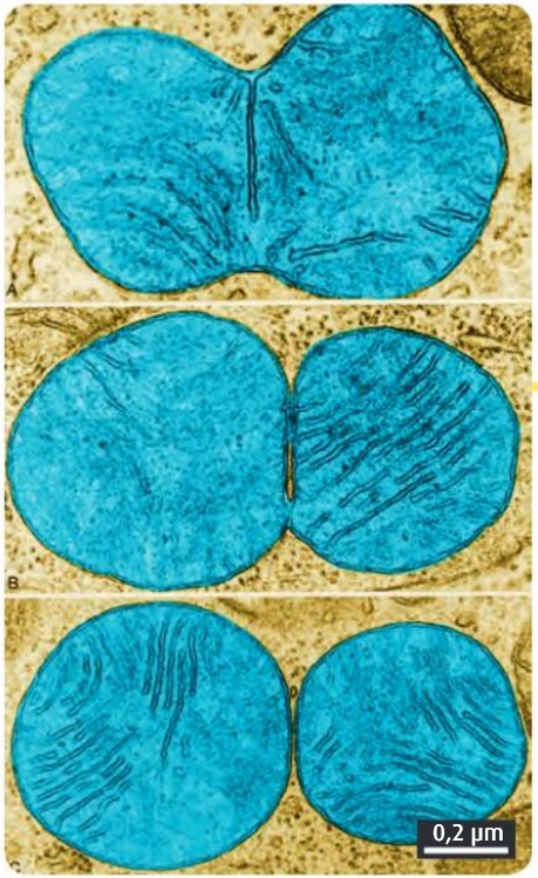


- Taille : 1 à 2 µm en général (jusqu'à 10 µm).
- Limitée par une double membrane.
- ADN sans protéines associées, formant un chromosome circulaire en de nombreux exemplaires identiques, codant la synthèse de protéines et d'ARN. La plupart des protéines mitochondriales sont synthétisées à partir de gènes nucléaires.
- Capables de division autonome par séparation en deux.

C Mitochondrie (observations au MET et caractéristiques).

[bordas]

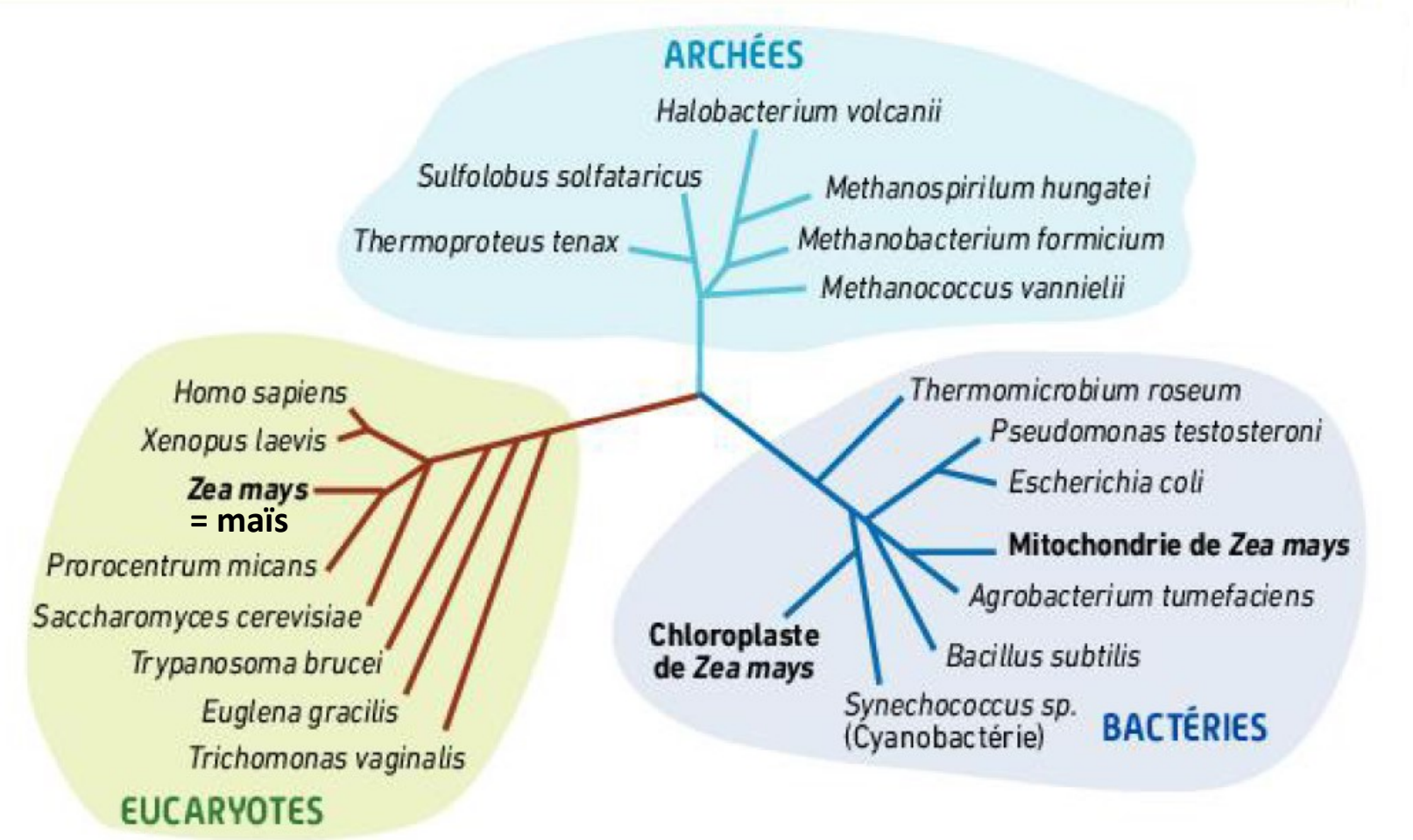
Similitudes avec les bactéries



2 **Mécanisme de division des mitochondries (vu au MET).** La division des mitochondries par mitose est indépendante des mitoses de la cellule qui les contient. Elle est par ailleurs semblable à la division bactérienne par scissiparité.

[belin]

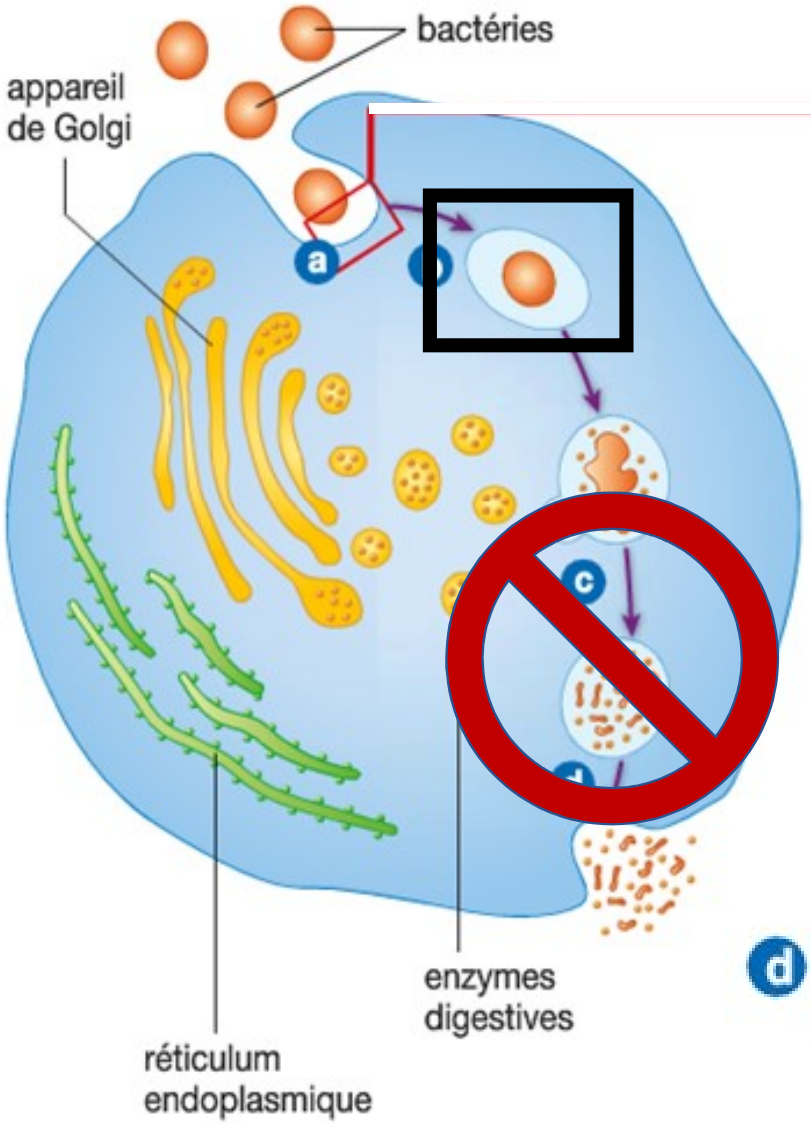
Arbre phylogénétique basé sur l'ARNr des ribosomes



Arbre phylogénétique du vivant basé sur la comparaison de l'ARN des ribosomes.

[bordas]

Origine de la double membrane des organites – RAPPELS 1ère – LA PHAGOCYTOSE



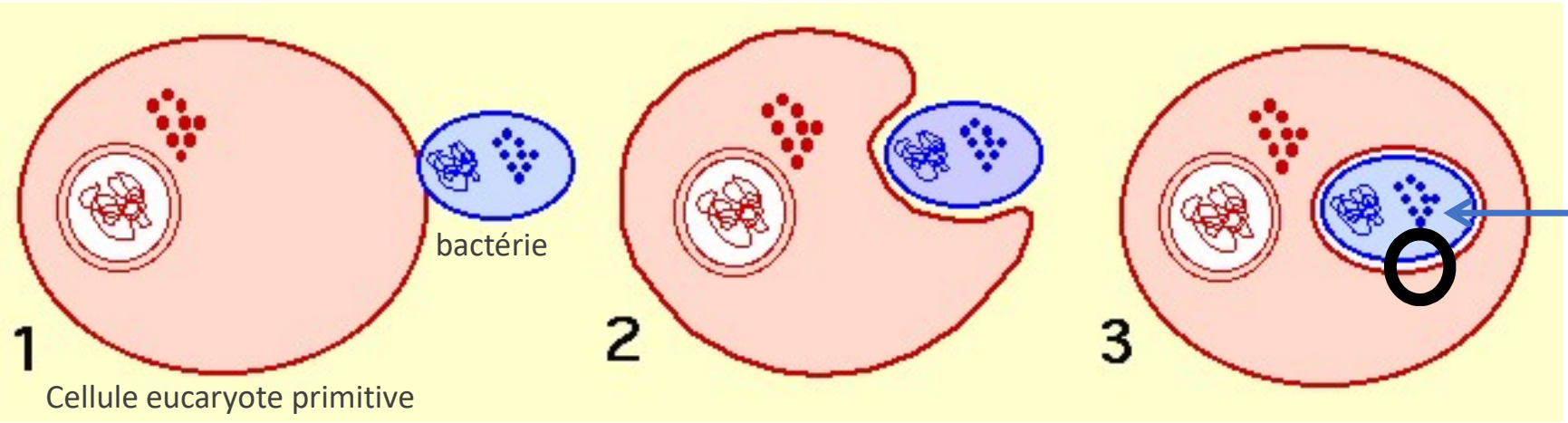
a Adhésion
Les éléments étrangers adhèrent à la membrane des phagocytes grâce aux récepteurs qui ont permis de les identifier.

b Ingestion
La cellule se déforme et englobe la particule dans une vacuole (phagosome) en l'entourant par des prolongements cytoplasmiques.

c Digest
Des e zym digest ves contenues dans es vés ules ytoplasmiques sont d rsées da phagosome.

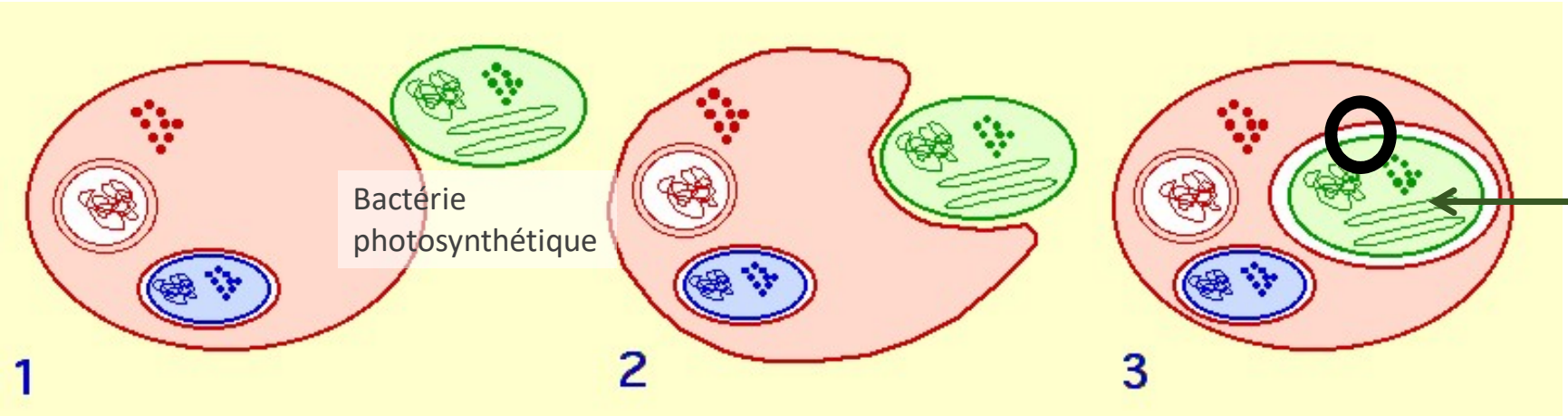
d Re t des déche
Apr digestio de élément étranger, les déchets sont tés à l'e rieur du phagocyte.

Origine de la double membrane des organites



Future mitochondrie

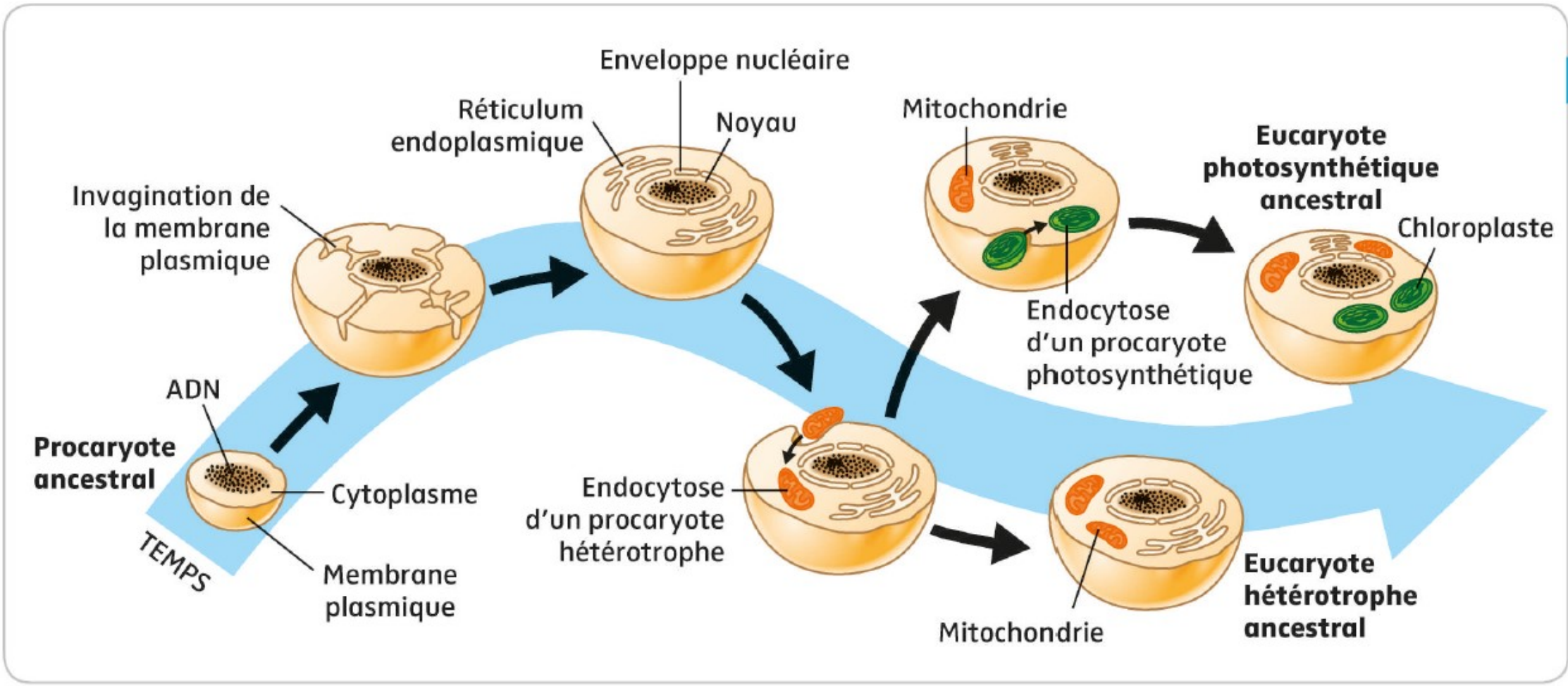
- Membrane ext = membrane plasmique de la cellule eucaryote
- Membrane int = membrane de la bactérie intégrée



Futur chloroplaste

[http://www.snv.jussieu.fr/]

La théorie endosymbiotique



[Nathan]

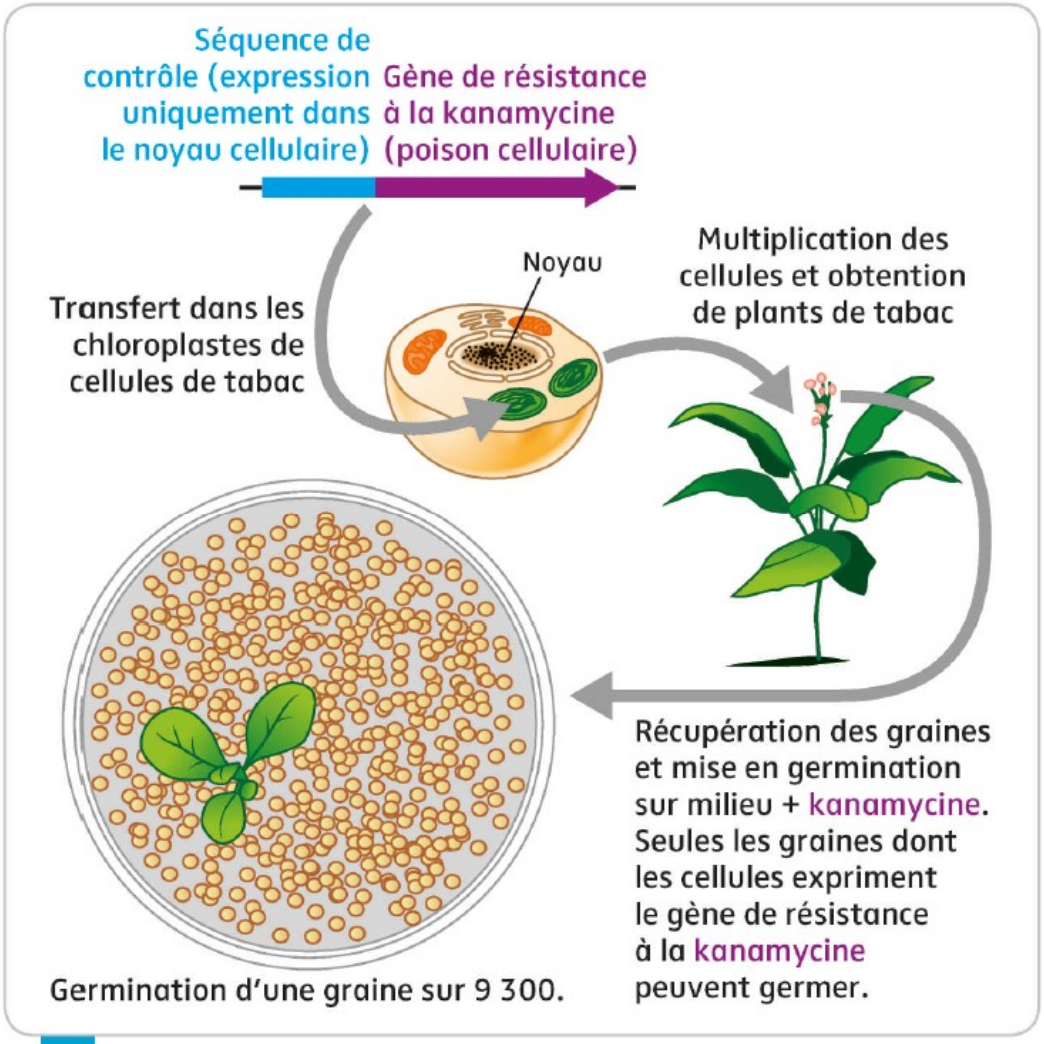
Evolution du génome des organites

	Plus proche parent bactérien libre	Génome des organites
Mitochondrie	1600 gènes	67 gènes
Chloroplaste	1500 à 10 000 gènes	87 gènes

6 **Nombre de gènes du génome des organites.**

[belin]

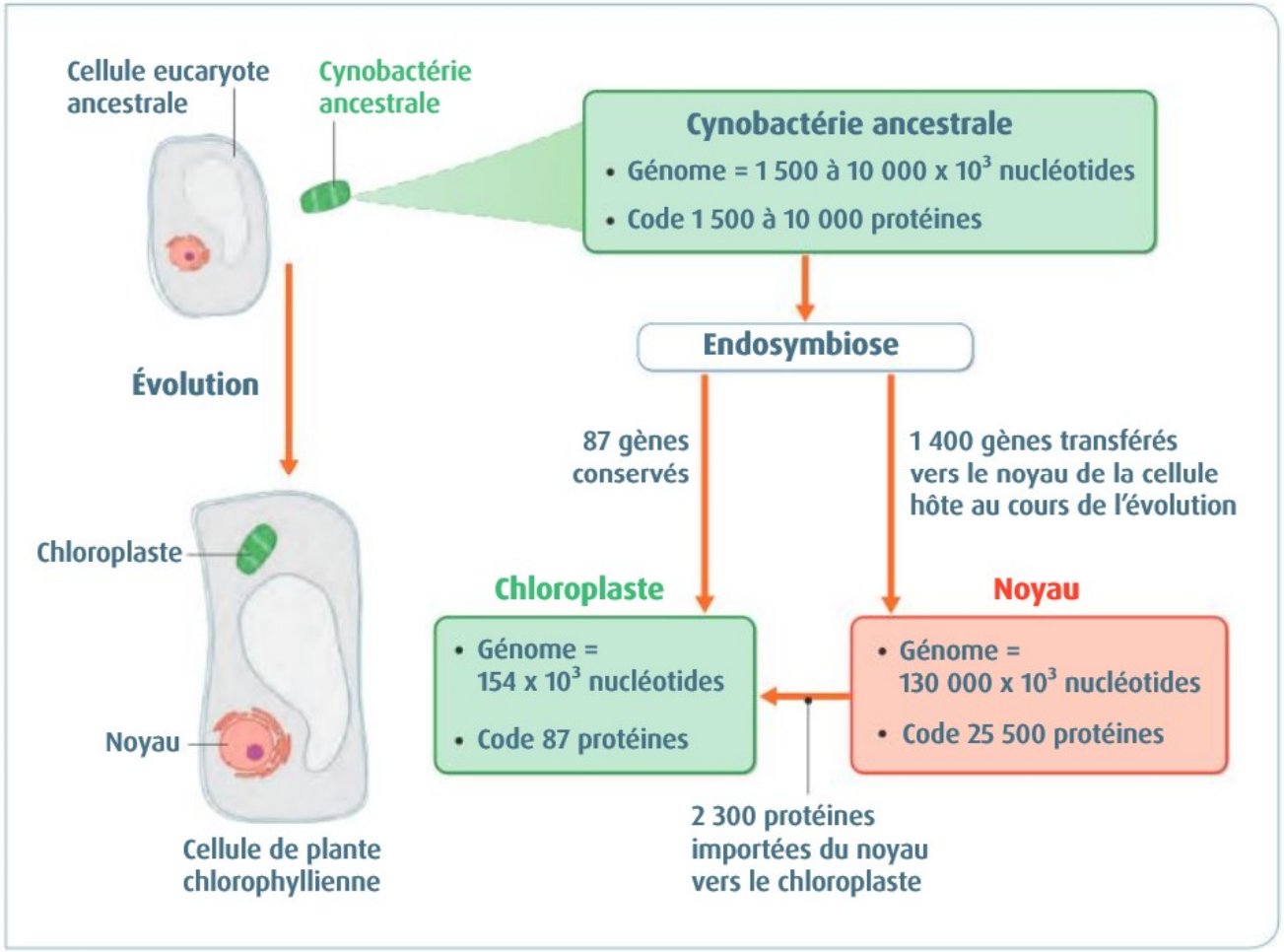
Evolution du génome des organites



4 Mise en évidence d'échanges génétiques entre compartiments cellulaires.

[Nathan]

Evolution du génome des organites



7 Échanges génétiques entre le génome nucléaire d'une plante verte (l'arabette des dames) et le génome de ses chloroplastes. On considère qu'un endosymbiote (organisme symbiotique intracellulaire) devient un organite lorsqu'il perd son autonomie génétique, c'est-à-dire qu'il devient incapable de vivre sans la cellule qui l'abrite.

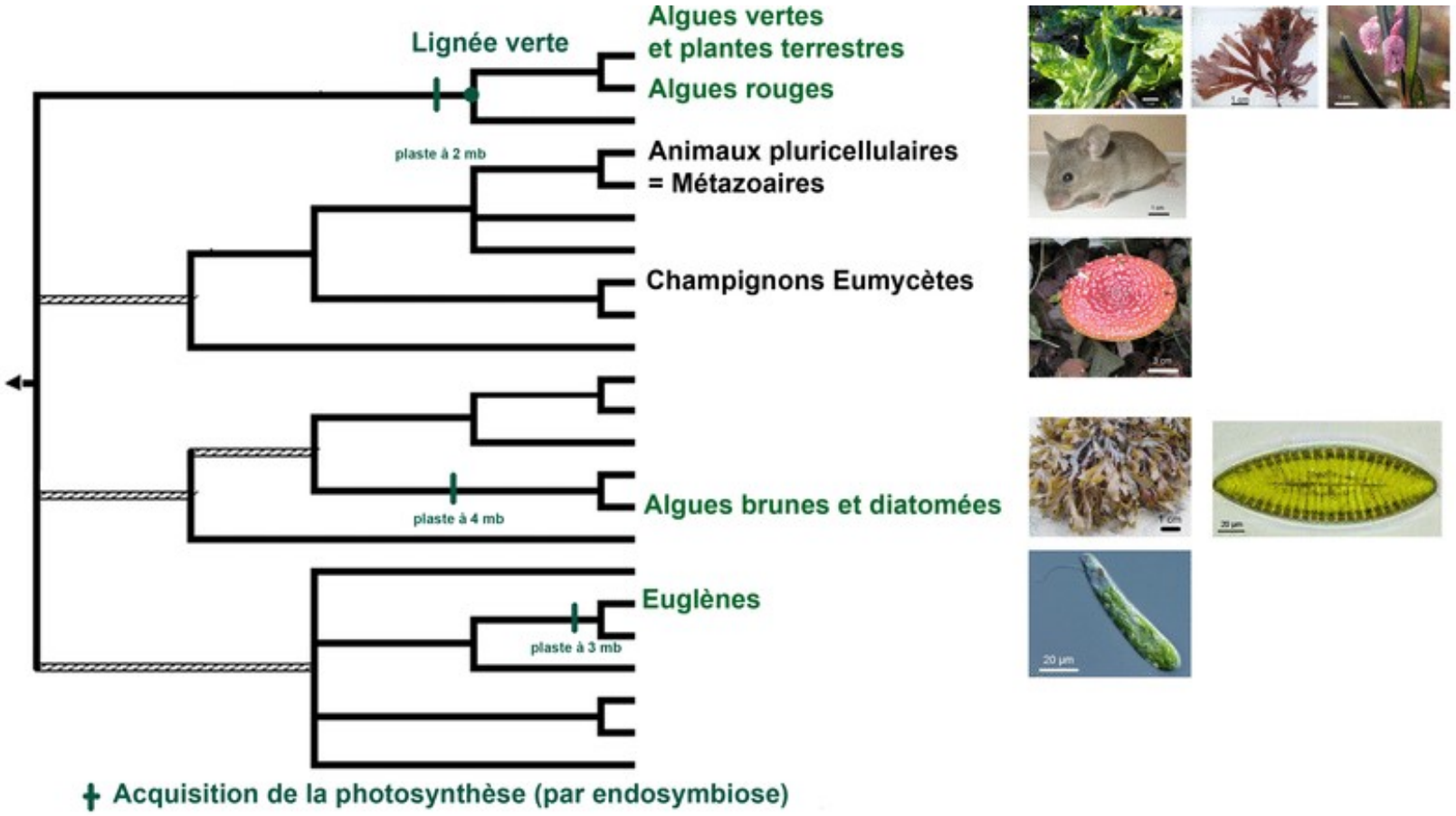
[belin]

Des endosymbioses multiples

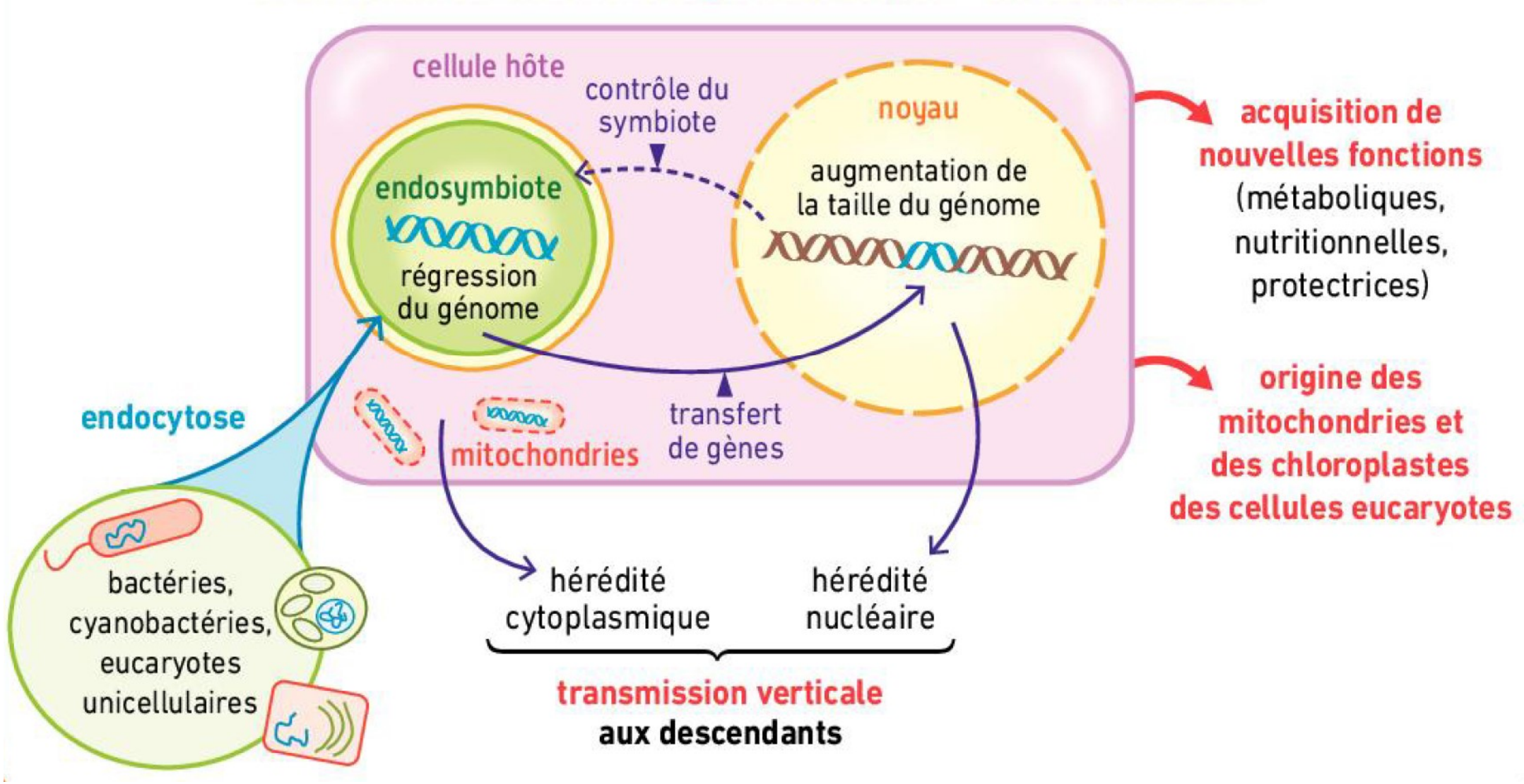
Euglène

Elodée

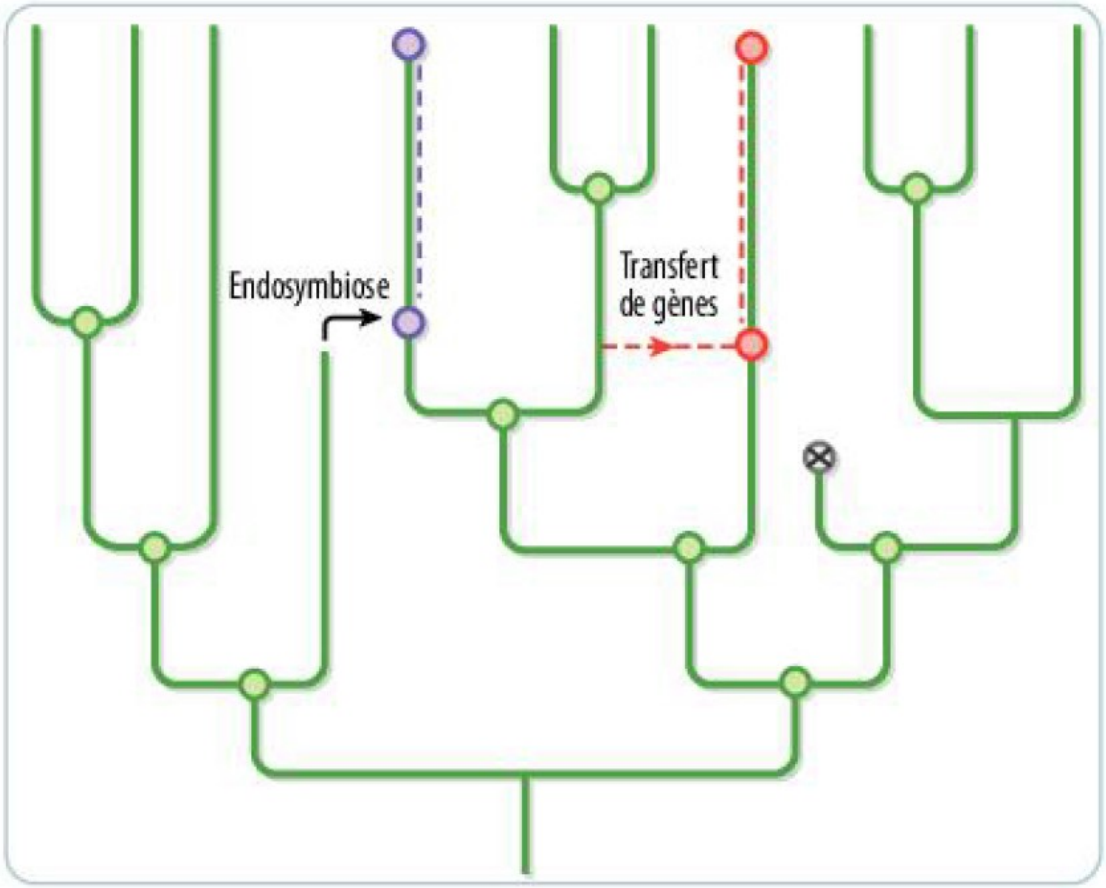
Des endosymbioses multiples



La théorie endosymbiotique



En résumé…



Exemple de réseau phylogénétique

Les lignées violette et rouge possèdent des gènes d'origines différentes.

[hachette]