



Lycée François-René DE CHATEAUBRIAND
 136 BOULEVARD DE VITRÉ, CS 10637
 35706 RENNES CEDEX 7
CLASSE PRÉPARATOIRE BCPST 1
 Biologie Chimie Physique Sciences de la Terre

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
 °° SCIENCES DE LA VIE °°
 >> Cours <<

Chapitre 6 : planches complètes

Organisation fonctionnelle de la cellule

Objectifs : extraits du programme

Savoirs visés	Capacités exigibles
SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule	
La cellule eucaryote est compartimentée, ce qui entraîne une régionalisation des fonctions et une coopération des compartiments dans le fonctionnement cellulaire. Le support de l'information génétique est présent dans plusieurs compartiments cellulaires.	<ul style="list-style-type: none"> - Discuter des intérêts et contraintes de la compartimentation dans le fonctionnement cellulaire. - Illustrer la diversité structurale et fonctionnelle des compartiments sur l'exemple de l'entérocyte et de la cellule du parenchyme palissadique. - Évaluer les dimensions d'une structure observée à partir de la connaissance de l'ordre de grandeur de quelques objets biologiques courants (membranes, organites...). - À l'aide de différentes techniques microscopiques, reconnaître les ultrastructures cellulaires eucaryotes : noyau, membranes, mitochondrie, chloroplaste, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, lysosome, vésicules de sécrétion, eu/hétérochromatine, nucléole. - Réaliser des colorations afin de mettre en évidence différentes structures cellulaires au microscope optique.
La cellule bactérienne contient un chromosome unique circulaire et éventuellement des plasmides. Elle est délimitée par une ou deux membranes et une paroi de peptidoglycane. Son cytoplasme est souvent peu compartimenté.	<ul style="list-style-type: none"> - Schématiser l'ultrastructure d'une bactérie. - À l'aide de techniques de microscopie, reconnaître les principales caractéristiques ultrastructurales d'une bactérie. - Réaliser une coloration de Gram afin d'identifier la nature Gram + ou Gram - d'une bactérie.
Précisions et limites : Les colorations usuelles réalisées en BCPST sont : coloration de Gram, carmino-vert de mirande, rouge neutre, bleu coton lactique, vert de méthyle, pyronine, lugol. Le principe de la coloration est connu mais le protocole n'est pas à mémoriser. Pour les peptidoglycane, le détail des monomères est hors programme.	
Les cellules possèdent un squelette interne dynamique : le cytosquelette. Chez les cellules eucaryotes, il est constitué de trois catégories de structures protéiques fibrillaires : les microfilaments d'actine, les microtubules de tubuline et les filaments intermédiaires. Le cytosquelette des bactéries présente des protéines homologues à celui des cellules eucaryotes.	<ul style="list-style-type: none"> - Illustrer les rôles du cytosquelette sur l'exemple de l'entérocyte et de la cellule du parenchyme palissadique (par exemple : association aux jonctions, structuration de l'enveloppe nucléaire, structuration des microvillosités, flux vésiculaires, cyclose des chloroplastes).

Précisions et limites : Seul le cytosquelette d'une cellule eucaryote est présenté avec le détail des structures moléculaires.	
Les cellules sont traversées par des flux de matière, d'énergie et d'information. Chez les Eucaryotes, une partie de ces flux transite par la membrane plasmique ou les systèmes endomembranaires. Ceci met en évidence la coopération fonctionnelle entre les compartiments.	<ul style="list-style-type: none"> - Argumenter l'existence de trois types de flux à l'aide des exemples de l'entérocyte, de la cellule du parenchyme palissadique et de E. coli. - Illustrer la coopération fonctionnelle entre les compartiments.
Précisions et limites : On mentionne les différents flux, les modalités précises sont développées dans la partie SV-C-3 (= chapitre 7 sur les membranes).	
Liens : Organisation morphologique et cytologique des organismes unicellulaires et contrôle de l'expression génétique des bactéries (SV- A-3) Organisation des jonctions intercellulaires (SV-C-1) Flux vésiculaires (SV-C-3) Divisions cellulaires (SV-F-1-2) Cytosquelette et croissance du tube pollinique (SV-G-1) Organisation fonctionnelle du cytosquelette du spermatozoïde (SV-G-3) Migration cellulaire au cours du développement animal (SV-H) Organisation fonctionnelle d'un neurone (SV-I-2)	

Introduction

La **cellule** est la **plus petite unité de structure et de fonctionnement d'un être vivant, limitée par une membrane et pourvue d'une information génétique portée par l'ADN**. On peut distinguer **deux grands types cellulaires** :

- La **cellule eucaryote** : **cellule compartimentée dont l'ADN est enfermé dans un noyau et dont les compartiments présentent une spécialisation fonctionnelle**. On trouve aussi un peu de matériel génétique dans certains compartiments (mitochondries, plastes).
- La **cellule procaryote** : **cellule souvent peu ou pas compartimentée** (mais on trouve des exceptions comme les Cyanobactéries) **dont l'ADN est situé dans une zone du cytoplasme nommée nucléoïde**. On trouve aussi un peu de matériel génétique dans les **plasmides, petits morceaux circulaires d'ADN**.

Les '**procaryotes**' comprennent les **Bactéries (= Eubactéries)** et les '**archées**' ; nous prendrons nos exemples chez les premières.

Le **précédent chapitre** a été l'occasion d'examiner l'**état pluricellulaire** et ses avatars (**chapitre 5**). On rappelle que les **organismes** peuvent être **uni-** (**constitués d'une seule cellule**) ou **pluricellulaires** (**constitués de nombreuses cellules**), même si la frontière n'est **pas toujours objectivable**.

On s'intéresse **ici** à l'**organisation des cellules** et ses **conséquences fonctionnelles**. On continue ici d'utiliser principalement les **exemples cellulaires du programme**. Rappelons qu'on nomme **ultrastructure l'organisation fine des cellules ou tissus accessible par le seul microscope électronique**.

Comment la constitution et la structuration des cellules impactent-elles leur fonctionnement ?

Les **aspects pratiques** sont traités dans le **TP SV C (Observations microscopiques de cellules et de tissus)**

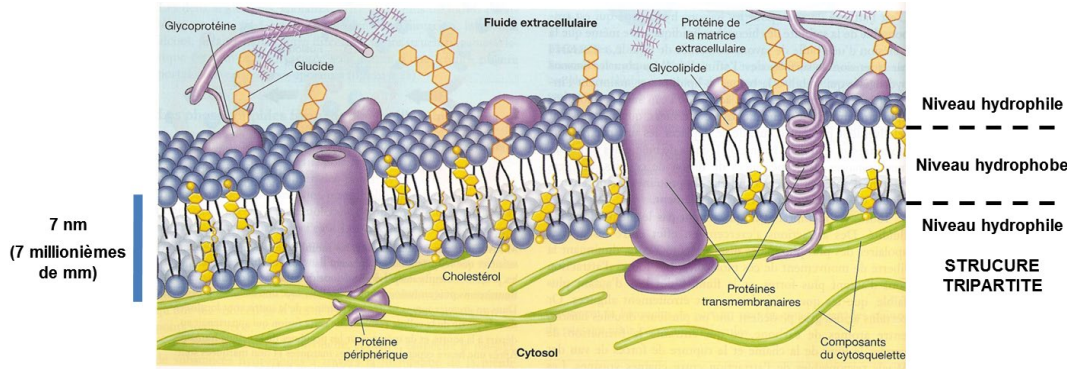
I. Des cellules limitées par une membrane, variablement compartimentées et présentant une information génétique

Capacités exigibles

- ✓ **Discuter** des intérêts et contraintes de la compartimentation dans le fonctionnement cellulaire.
- ✓ **Illustrer** la diversité structurale et fonctionnelle des compartiments sur l'exemple de l'entérocyte et de la cellule du parenchyme palissadique.
- ✓ **Évaluer** les dimensions d'une structure observée à partir de la connaissance de l'ordre de grandeur de quelques objets biologiques courants (membranes, organites...).
- ✓ À l'aide de différentes techniques microscopiques, **reconnaître** les ultrastructures cellulaires eucaryotes : noyau, membranes, mitochondrie, chloroplaste, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, lysosome, vésicules de sécrétion, eu/hétérochromatine, nucléole.
- ✓ **Schématiser** l'ultrastructure d'une bactérie.
- ✓ À l'aide de techniques de microscopie, **reconnaître** les principales caractéristiques ultrastructurales d'une bactérie.

A. Une limitation des cellules et des compartiments par des membranes biologiques

Le chapitre 7 (Membranes) développera ces aspects.



▲ FIGURE 1. Une membrane biologique : la membrane plasmique.
Adapté d'après RAVEN *et al.* (2007).

▼ TABLEAU I. Composition de diverses membranes. D'après PEYCRU *et al.* (2013).

Structure tripartite : la membrane comprend deux niveaux hydrophiles (au contact des milieux aqueux) prenant en sandwich un niveau hydrophobe.

Glycocalyx = cell coat (manteau cellulaire) : ensemble des petits glucides portés par certaines protéines et certains lipides du côté externe de la membrane plasmique (ne se trouve pas sur les autres membranes !).

Membranes	Épaisseur en nm	Structure	Composition en lipides totaux	Composition en protéines totales
Plasmalemme	7,5 *	tripartite et glycocalyx en plus	42 %	58 %
Réticulum endoplasmique	5 à 6	tripartite	30 %	70 %
Appareil de Golgi	6 à 7	tripartite	35 %	65 %
Enveloppe plastidiale	6 **	tripartite	60 %	40 %
Thylacoïdes	7 ***	tripartite	50 % dont 12 % de pigments	50 %
Membrane mitochondriale externe	6	tripartite	40 %	60 %
Membrane mitochondriale interne	6 ***	tripartite	20 %	80 %
Plasmalemme bactérien	6 ***	tripartite	30 %	70 %

* : sans tenir compte du glycocalyx ; ** : épaisseur de chaque membrane de l'enveloppe ; *** : sans tenir compte des sphères pédonculées ; compositions moyennes exprimées en % de la masse totale de la fraction.

B. Une haute compartimentation des cellules eucaryotes impliquant une spécialisation et une coopération des volumes cellulaires

1. Nature et conséquences fonctionnelles de la compartimentation

a. Notions de compartiment et d'organites

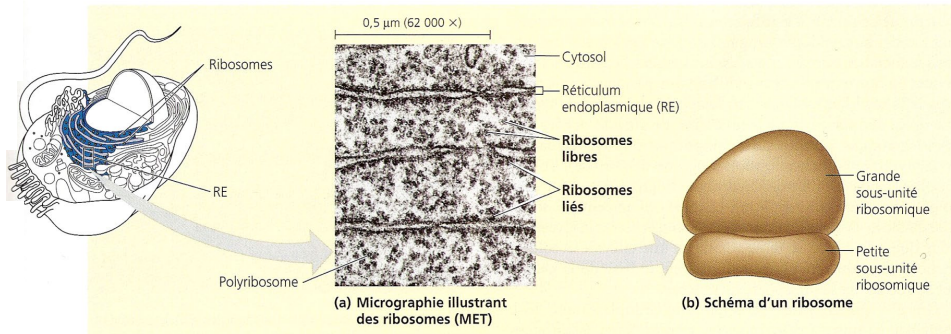
b. Intérêts de la compartimentation cellulaire

c. Limites et contraintes de la compartimentation cellulaire

2. Le cytosol ou hyaloplasme, liquide fondamental de la cellule contenant des enzymes nombreuses et des ribosomes



Le **cytosol** est parfois improprement appelé « **cytoplasme** » mais c'est **abusif** ; le **cytoplasme** est rigoureusement **l'ensemble constitué par le cytosol ET tous les organites à l'exception du noyau**.



▲ FIGURE 2. **Les ribosomes**. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

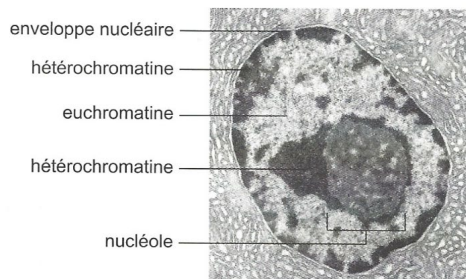
3. Le noyau, organe bimembranaire rassemblant l'essentiel du matériel génétique de la cellule

La chromatine baigne dans le nucléoplasme.

La microscopie électronique à transmission permet de reconnaître deux catégories bien différentes :

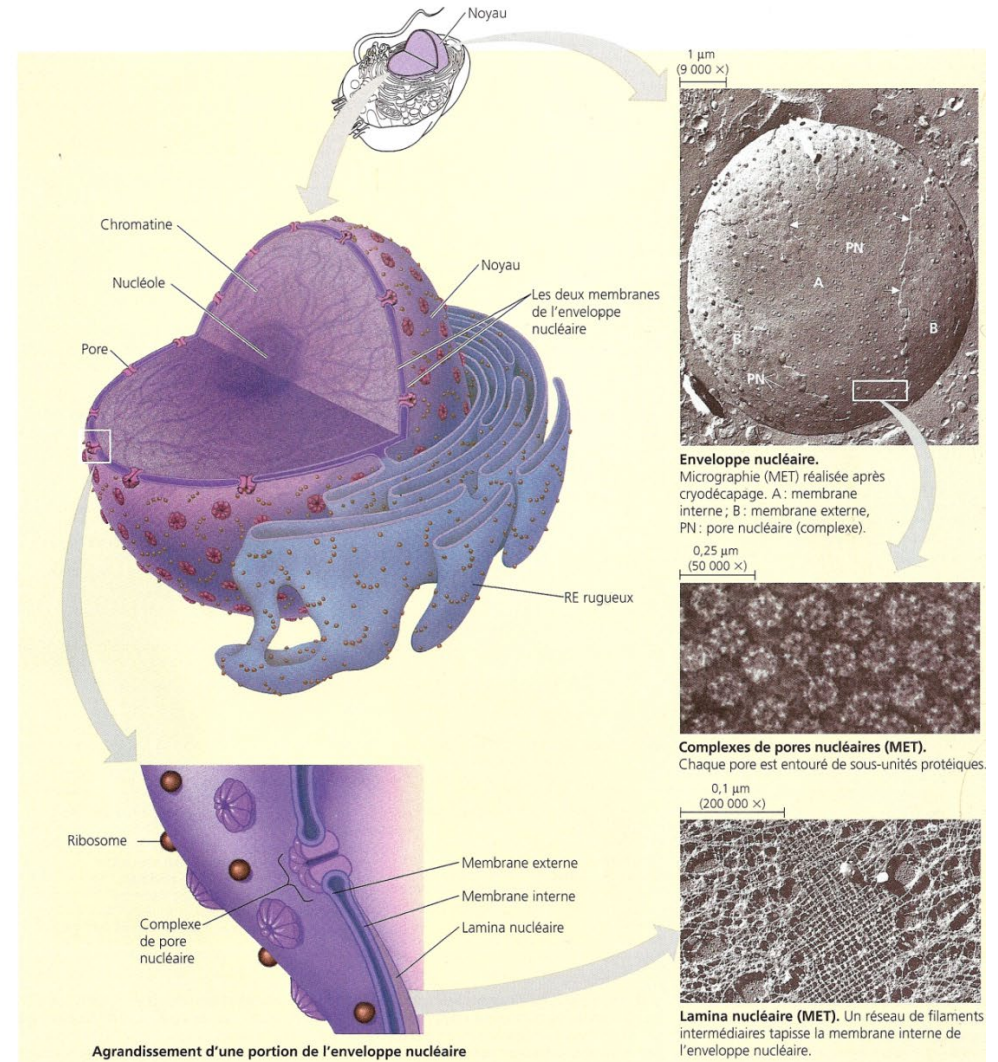
- l'**hétérochromatine** (ou chromatine dense, très opaque aux électrons) localisée essentiellement en périphérie contre la face interne de l'enveloppe nucléaire et autour du ou des nucléoles.
- l'**euchromatine** dispersée dans le nucléoplasme.

Sur le plan fonctionnel, l'hétérochromatine est inaccessible aux ARN pol, à la différence de l'euchromatine ; c'est pourquoi l'hétérochromatine est qualifiée d'inactive contrairement à l'euchromatine.



Noyau cellulaire et chromatine observés au M.E.T.
(Cliché J. André labo, BC4, Orsay, « Atlas de Biologie cellulaire », J.-C. Callen, J.-C. Rolland, A. et D. Szöllösi, 5e éd. Dunod, 2001).»

▲ FIGURE 5. **Allure du noyau au MET (taille env. 4 µm)**. D'après PEYCRU et al. (2013).



Noyau et enveloppe nucléaire. La chromatine, constituée d'ADN et de protéines, se trouve à l'intérieur du noyau. Lorsque la division cellulaire débute, les chromosomes deviennent distincts et visibles à mesure que la chromatine se condense. Le nucléole est le lieu de synthèse des ribosomes. L'enveloppe nucléaire, formée de deux membranes séparées par un espace étroit, est percée de pores ; la membrane interne est tapissée de la lamina nucléaire.

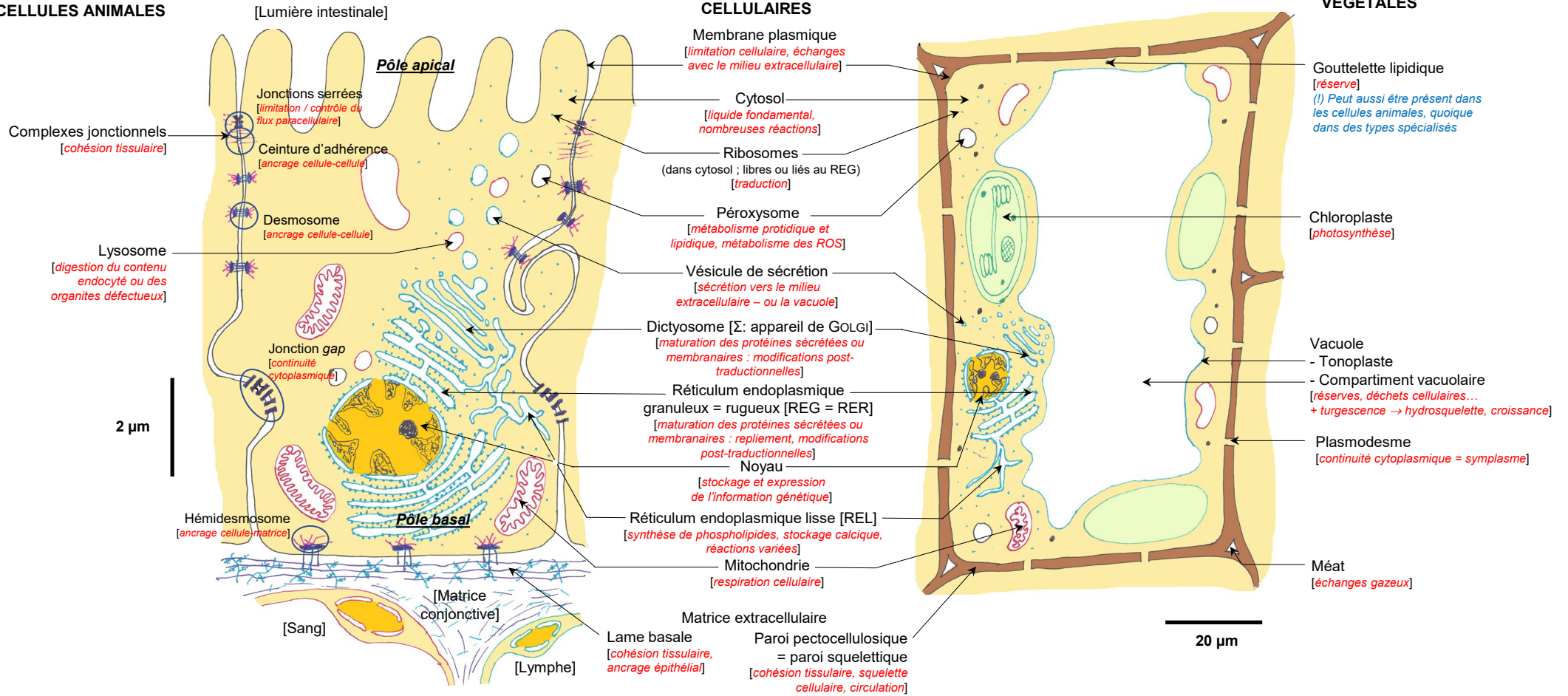
La MET au coin supérieur droit est tirée de L. Orci et A. Parrelet, *Freeze-Etch Histology* (Heidelberg : Springer-Verlag, 1975). © 1975 Springer-Verlag. La MET à droite et au centre est tirée de C. Faberge, *Cell Tissue Res* 151(1974): 403. © 1975 Springer-Verlag.

▲ FIGURE 4. **Le noyau**. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

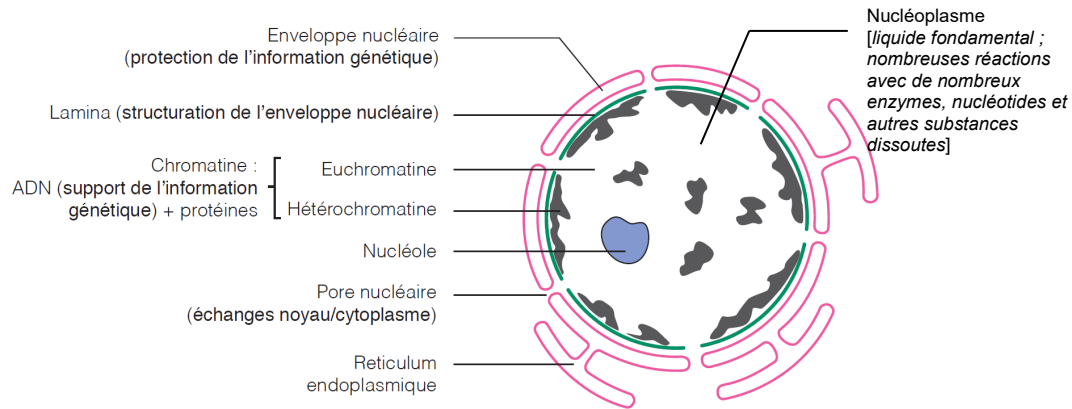
STRUCTURES PROPRES AUX CELLULES ANIMALES

STRUCTURES COMMUNES AUX DEUX TYPES CELLULAIRES

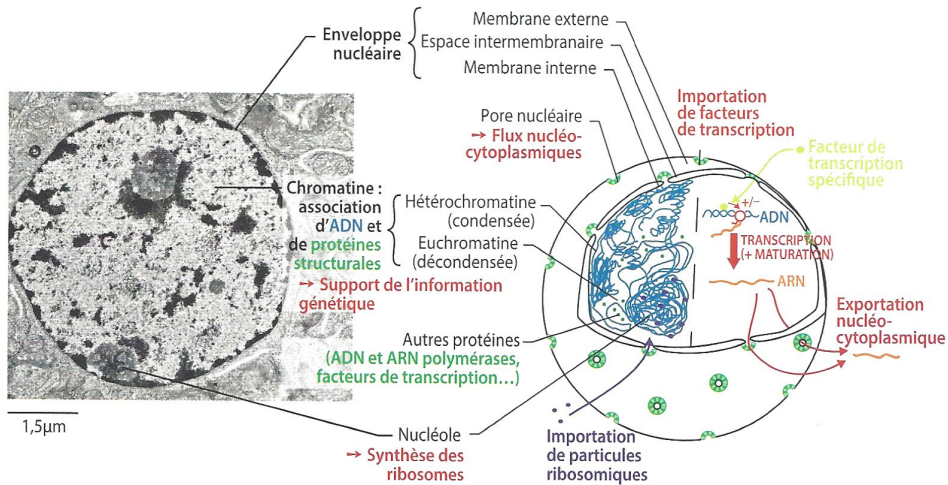
STRUCTURES PROPRES AUX CELLULES VÉGÉTALES



▲ FIGURE 3. Organisation des cellules eucaryotes : l'exemple d'un entérocyte (Mammifères) et d'une cellule du parenchyme foliaire palissadique (Angiospermes Eudicotylédones). Original 2021.



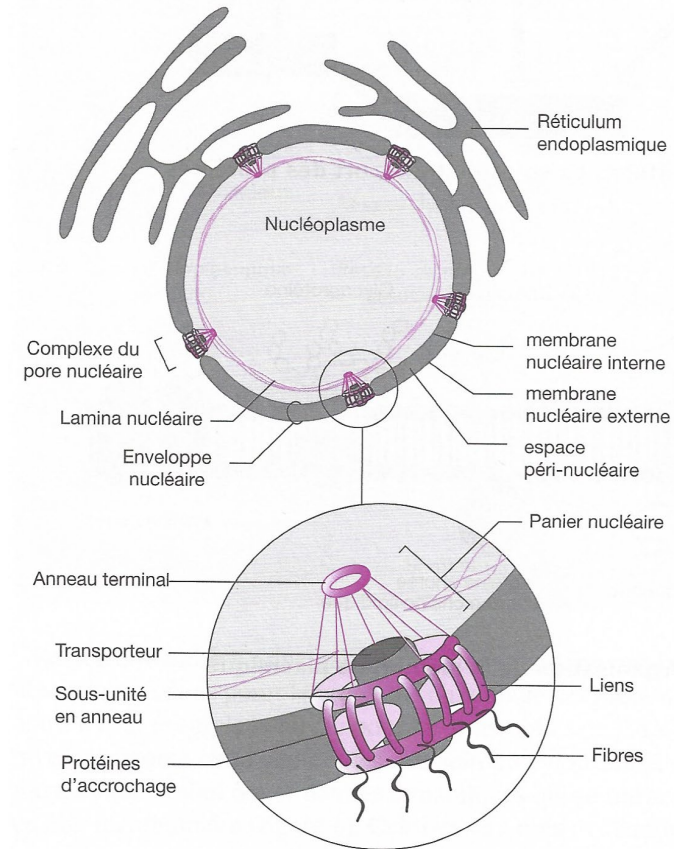
▲ FIGURE 6. Organisation du noyau interphasique (taille env. 4-5 µm).
D'après SEGARRA *et al.* (2014), complété.



▲ FIGURE 7. Le noyau : une vision fonctionnelle de son organisation.
D'après DAUTEL *et al.* (2021).

Encadré A Les pores nucléaires, interfaces d'échanges entre noyau et cytosol

Pour information – d'après BOUJARD *et al.* (2015)



➤ Les **pores nucléaires** sont les **zones où les deux membranes du noyau fusionnent** ; il s'y trouve un **complexe protéique qui assure et régule les échanges entre noyau et cytosol** : **sorties d'ARNm, entrées et sorties de protéines, sorties des sous-unités ribosomiques** (dont on rappelle qu'elles sont édifiées dans le noyau)... mais aussi **entrées et sorties de petites molécules organiques** (nucléotides, oses...). La **zone d'ouverture** a un diamètre d'environ **45 nm**.

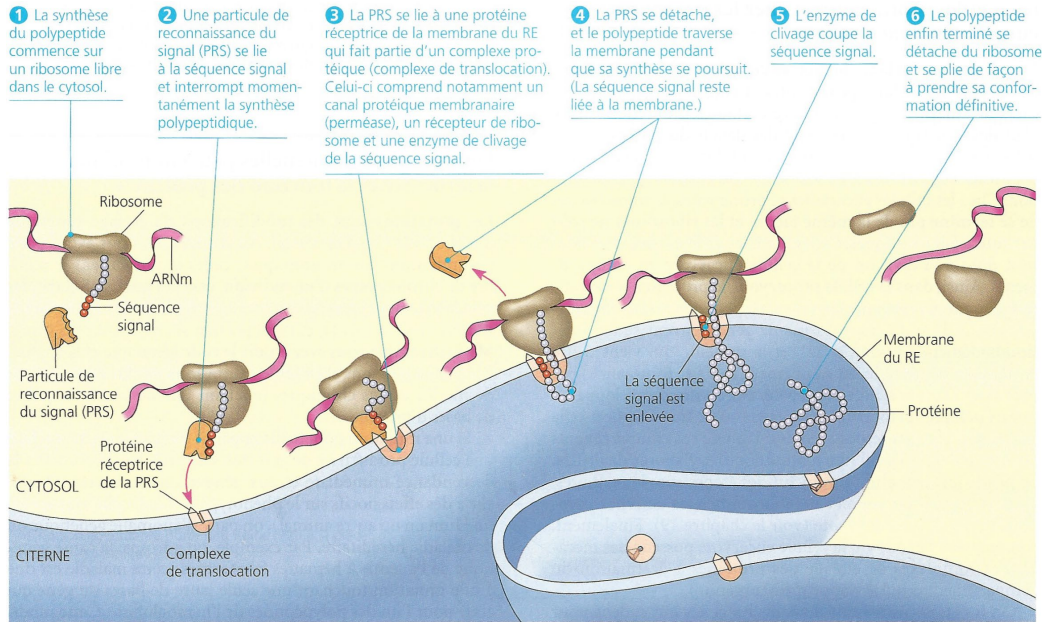
➤ Dans le détail, la **partie transmembranaire** comprend de **multiples sous-unités** ainsi que, **côté nucléoplasmique**, des **sous-unités** formant un **panier nucléaire** (dont un **anneau terminal**) qui s'ancre sur les **lamines nucléaires** et, **côté cytosolique**, des **protéines fibrillaires** plongeant dans le **cytosol**.

4. Un ensemble de compartiments plutôt monomembranaires impliqués dans les flux vésiculaires : le système endomembranaire

a. Le réticulum endoplasmique granuleux (REG) ou rugueux (RER), ensemble de citernes couvertes de ribosomes où mûrissent les protéines sécrétées, membranaires ou du système endomembranaire

Pour information, les mots en « -ule » en cytologie désignent souvent des **petites structures cellulaires limitées par une membrane** :

- Les **sacculés** sont des **petits sacs membraneux, d'épaisseur généralement constante**
- Les **tubules** sont des **petits tubes membraneux**
- Les **vésicules** sont des **structures sphériques limitées par une membrane qui peuvent se déplacer dans la cellule.**



Mécanisme de signalisation pour le ciblage des protéines à destination du RE. Les polypeptides devant être affectés au réseau intracellulaire de membranes ou sécrétés à l'extérieur de la cellule commencent par une

séquence signal, c'est-à-dire par une série d'acides aminés qui leur assigne une destination précise, le RE. Ce schéma montre successivement le début de la synthèse d'une protéine destinée à la sécrétion et son arrivée dans le RE. Sa maturation se poursuit dans le RE, puis dans l'appareil de Golgi.

▲ **FIGURE 8. L'adressage protéique vers le REG : un exemple d'adressage co-traductionnel.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

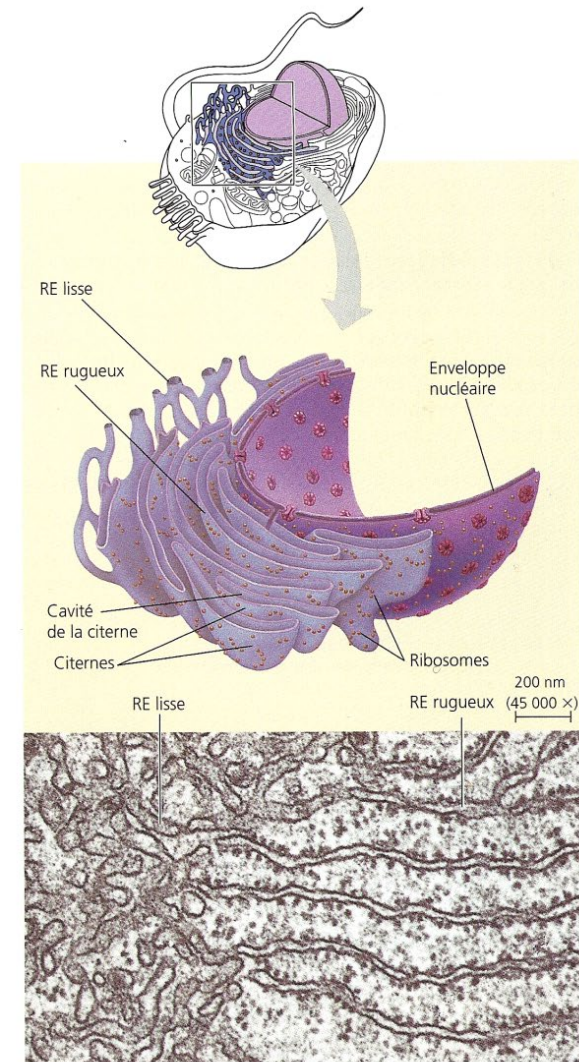
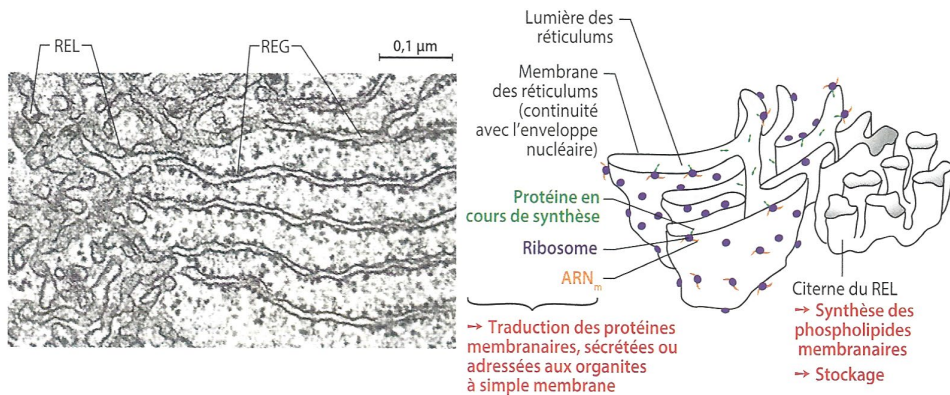


FIGURE 7.11 Réticulum endoplasmique (RE). Le réticulum endoplasmique (RE) est un réseau membranaire de tubules et de sacs aplatis appelés citernes. Celles-ci délimitent une cavité remplie de solutions diverses. La membrane du réticulum endoplasmique prolonge l'enveloppe nucléaire. Cette micrographie électronique illustrant une coupe du RE permet de distinguer le réticulum endoplasmique rugueux (ou granulaire), parsemé de ribosomes sur sa face cytoplasmique, et le réticulum endoplasmique lisse (MET).

▲ **FIGURE 9. Le réticulum endoplasmique (RE) : REG (granuleux) et REL (lisse).**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).



▲ FIGURE 10. Le réticulum endoplasmique : une vision fonctionnelle de son organisation.
 D'après DAUTEL *et al.* (2021).

b. Le réticulum endoplasmique lisse (REL), réseau tubulaire où a lieu la synthèse des lipides membranaires (voire des hormones stéroïdes ou des triglycérides) et le stockage de calcium (notion de calciosome)

Focus sur l'entérocyte et les chylomicrons

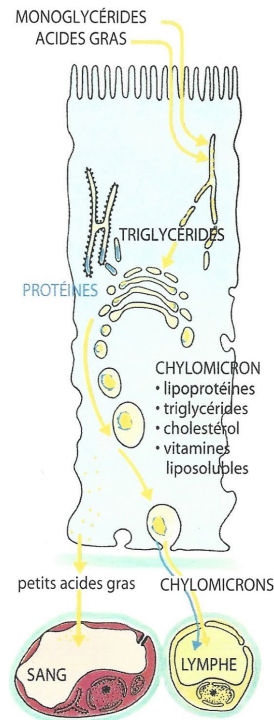
Voir la figure 11

Les micelles lipidiques présentes dans l'intestin contiennent des acides gras et des monoglycérides qui sont diffusent au travers de la bicouche phospholipidique du plasmaleme. Peu solubles dans le cytosol, ces lipides s'agrègent en microgouttelettes qui atteignent rapidement le réticulum endoplasmique lisse (REL) à l'intérieur duquel ils pénètrent là encore par diffusion.

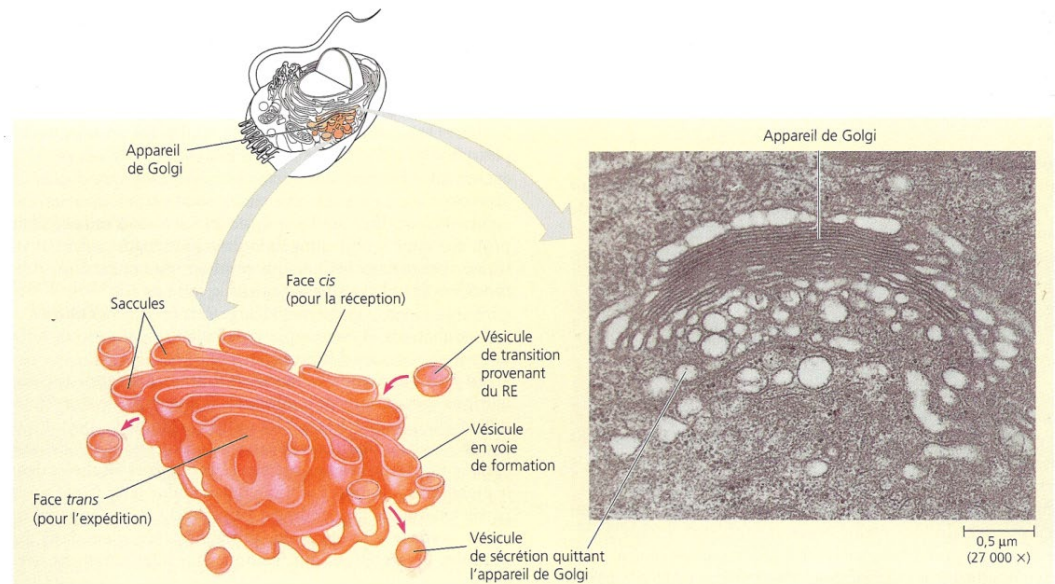
Dans le REL, des enzymes permettent la synthèse de triglycérides. Ils sont alors associés dans des gouttelettes lipidiques à d'autres lipides (cholestérol estérifié ou non, phospholipides...) et des protéines puis migrent, via des vésicules de transition, vers l'appareil de Golgi où d'autres protéines en provenance du REG sont ajoutées et où, progressivement, s'édifient ainsi *in fine* des vésicules d'exocytose contenant les fameuses gouttelettes lipidiques micrométriques exocytées au pôle basal des entérocytes, les chylomicrons.

La taille des chylomicrons (jusqu'à 1 µm) les empêche de passer la barrière de l'endothélium des capillaires sanguins, de même que la présence autour de ces capillaires d'une lame basale riche en glycoprotéines peu encline au passage des structures massives. En revanche, la lame basale des chylifères est plus mince et leur endothélium est perforé de fentes entre ses cellules de sorte que le passage des chylomicrons y est aisé.

➤ FIGURE 11. La genèse des chylomicrons.
 D'après PÉRILLEUX *et al.* (2002).



c. L'appareil de GOLGI, ensembles des dictyosomes où sont modifiées les protéines sécrétées / membranaires / du réseau endomembranaire et où certains composés matriciels glucidiques sont synthétisés [incl. vésicules d'exocytose]

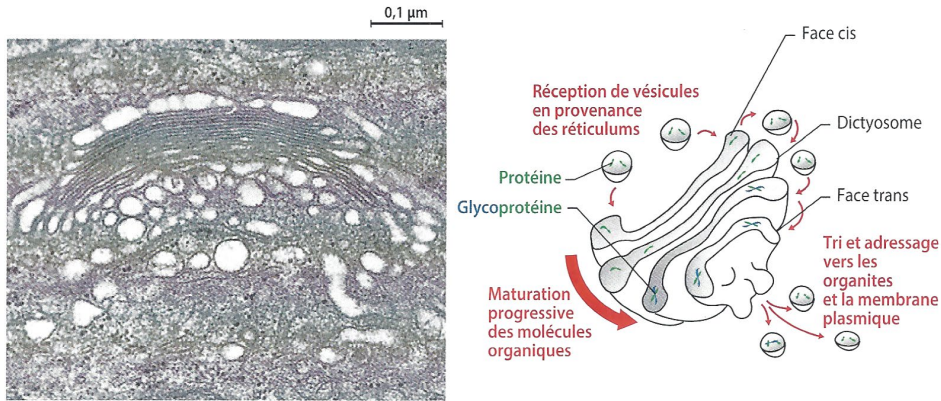


Appareil de Golgi. L'appareil de Golgi est formé de piles de saccules membraneux et aplatis qui ne sont pas reliés en réseau, contrairement aux citernes du RE. Il reçoit les vésicules de transition provenant du réticulum endoplasmique, modifie les matières qu'elles

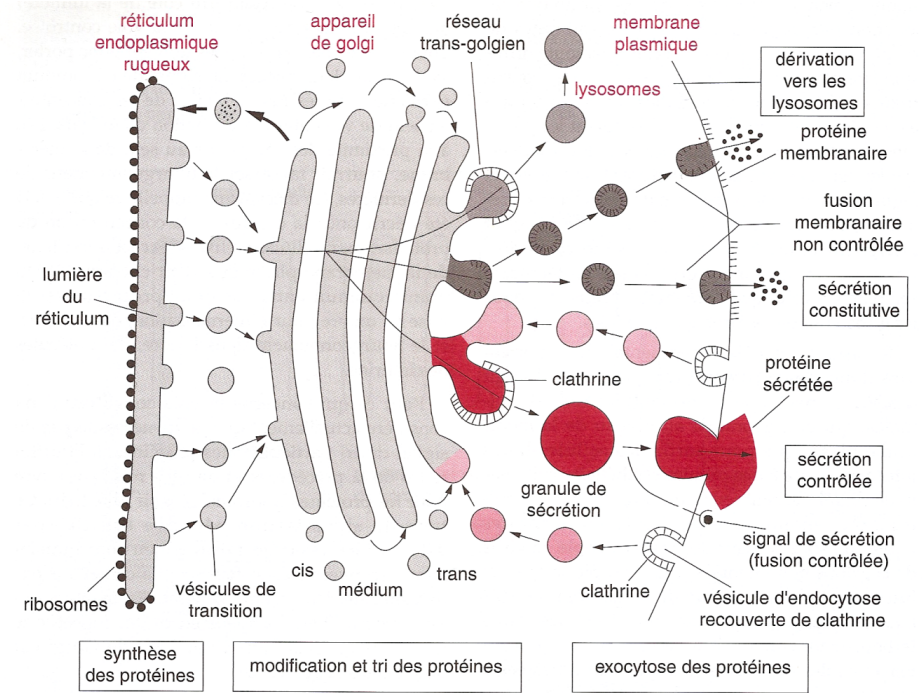
contiennent et les emmagasine en attendant leur exportation vers la membrane plasmique ou d'autres organites. Remarquez les vésicules qui commencent à se former aux extrémités des citernes, ainsi que les vésicules de sécrétion qui se sont détachées de l'organite. L'appareil de Golgi

présente une polarité structurale et fonctionnelle : il comporte une face cis, qui reçoit les vésicules de transition, et une face trans, qui libère des vésicules de sécrétion (à droite, MET).

▲ FIGURE 12. Un dictyosome. D'après CAMPBELL & REECE (2004).



▲ FIGURE 13. **Un dictyosome : organisation fonctionnelle.** D'après DAUTEL et al. (2021).

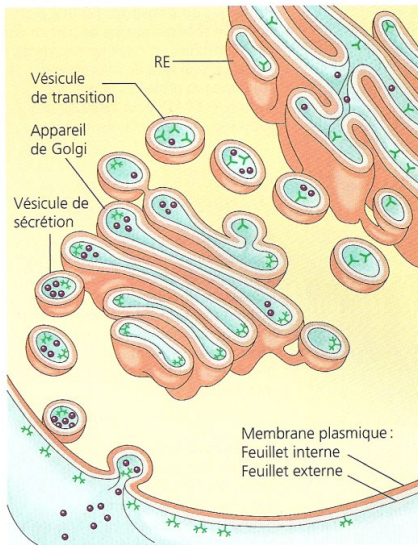


Diverses voies suivies par les protéines à travers l'appareil de Golgi

Trois voies sont identifiées, qui conduisent les protéines vers les lysosomes, la membrane plasmique ou le milieu extracellulaire. Deux modes de sécrétion doivent être distingués : le mode contrôlé, qui concerne les cellules sécrétrices spécialisées, et le mode constitutif, qui concerne toutes les cellules. Le transport rétrograde des protéines du réticulum (protéines résidentes et récepteurs associés) est mentionné. Noter la présence ou non de clathrine sur certaines des vésicules impliquées dans ces processus.

▲ FIGURE 15. **Appareil de GOLGI et flux vésiculaire [pour information].** D'après CALLEN (2005).

d. Les lysosomes, organites de taille vésiculaire, acides, riches en enzymes hydrolytiques digérant les molécules endocytées et les organites endommagés [cellules animales]



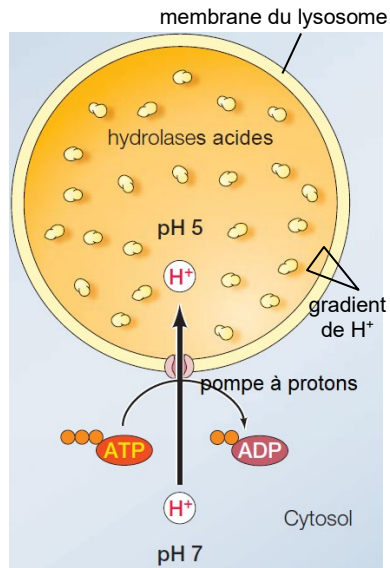
▲ FIGURE 14. **Trafic vésiculaire du REG jusqu'au plasmalemm en passant par le GOLGI.** Les protéines sécrétées sont représentées par les boules et les arbuscules symbolisent les protéines membranaires. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

Lien de l'appareil de Golgi avec le REG et les vésicules d'exocytose

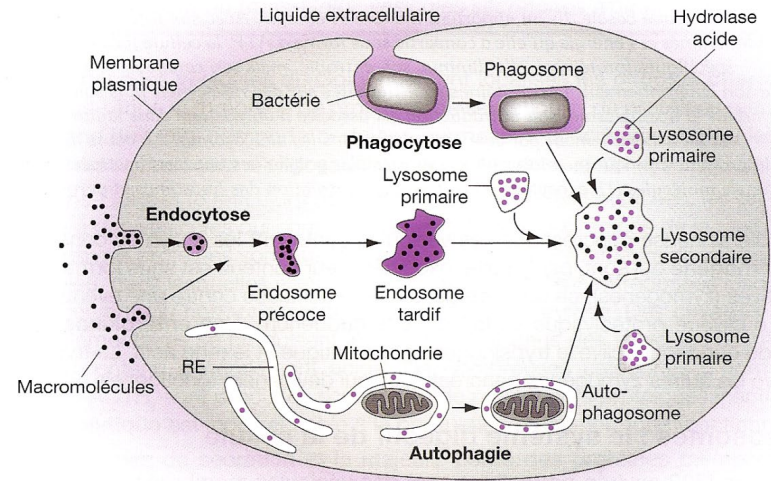
Des vésicules se forment par **bourgeoisement** à la fin du RER et fusionnent alors avec l'appareil de GOLGI. Cela permet aux protéines de passer du RER à l'appareil de GOLGI. On appelle ces vésicules des **vésicules de transition** ; l'ensemble des vésicules de transition et du saccule cis de l'appareil d'un dictyosome forme le **réseau cis-golgien (CGN : cis GOLGI network)**.

Le **passage** d'un saccule d'un dictyosome à un autre se fait par des **vésicules** également.

D'autres vésicules se forment enfin dans la **partie terminale (côté trans) du GOLGI** et leur contenu est sécrété hors de la cellule par **exocytose** ou envoyé vers d'autres organites du **réseau endomembranaire (lysosomes, vacuole...)**. La **zone de formation des vésicules golgiennes terminales** est appelée **réseau trans-golgien (TGN : trans GOLGI network)**.



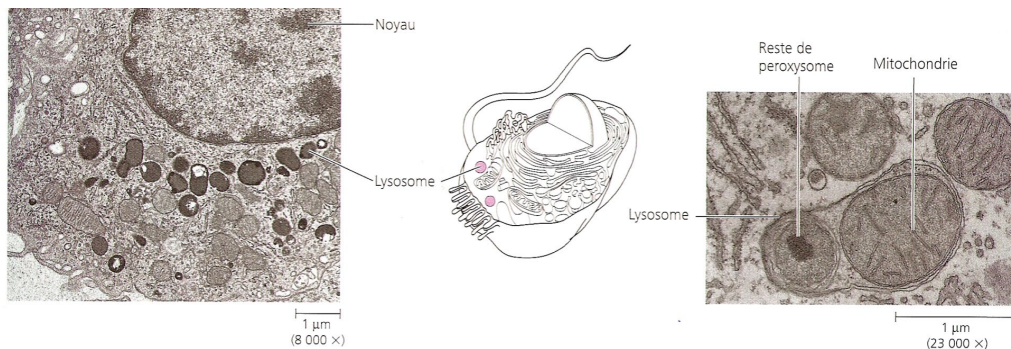
▲ FIGURE 16. **Lysosome**.
D'après COOPER (2019),
traduit et adapté.



Rôles des lysosomes

L'endocytose par récepteurs interposés (p. 357) conduit à un endosome qui fusionne avec un lysosome primaire (I). De la même manière, des particules ou des cellules sont phagocytées et le phagosome fusionne avec un lysosome I. Des organites vieillissants (peroxyosomes, mitochondries) ou des volumes de cytoplasme sont entourés dans une citerne d'origine non établie qui fusionnent avec un lysosome I. Dans tous les cas, les enzymes digèrent les macromolécules ingérées.

▲ FIGURE 18. **Lysosomes et digestion des endosomes**. D'après BREUIL (2007).



(a) Lysosomes d'un globule blanc

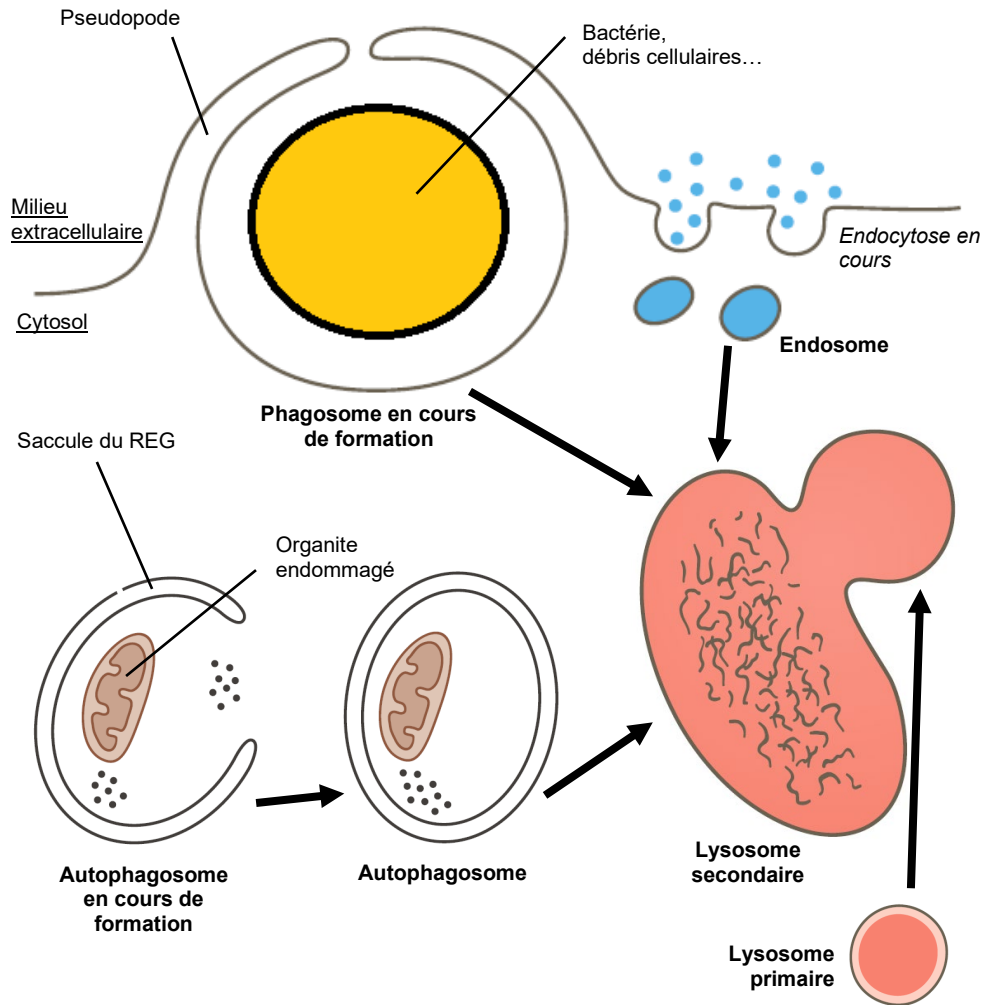
Lysosomes. (a) Les lysosomes de ce globule blanc de rat sont très sombres, parce que le colorant utilisé réagit avec l'un des produits de la digestion qu'ils contiennent (MET). Ce genre

de globule blanc ingère les agresseurs bactériens ou viraux et les détruit dans ses lysosomes. (b) Dans le cytoplasme de cette cellule hépatique, on peut voir un lysosome autophagique qui a

(b) Digestion d'organites par un lysosome

englobé deux organites défectueux, en l'occurrence une mitochondrie et un peroxyosome (MET).

▲ FIGURE 17. **Les lysosomes**. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

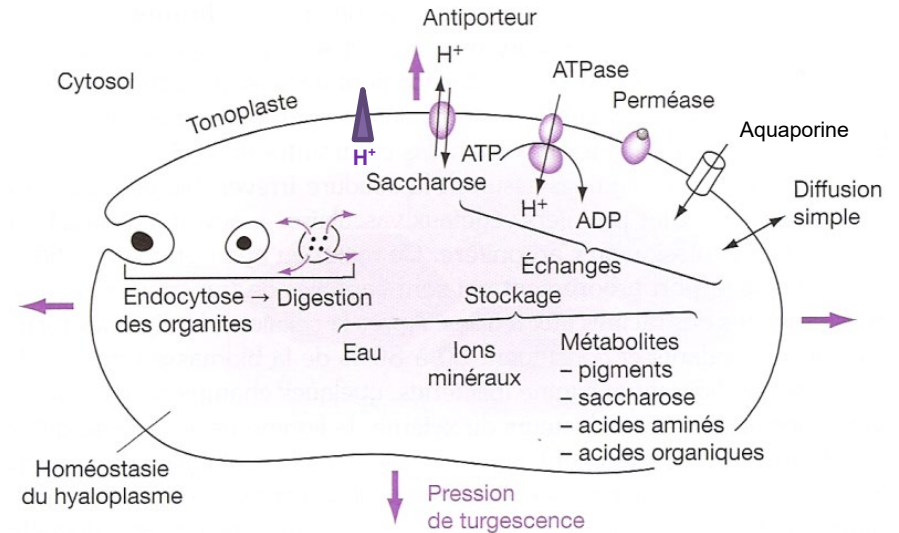


▲ FIGURE 19. **Lysosomes et fonctionnement cellulaire : une vision simplifiée.**
 Les flèches indiquent des déplacements, des formations de vésicules et/ou des fusions.
 Original, très librement recomposé et modifié d'après des schémas de LÜLLMANN-RAUCH & ASAN (2019).

- **Endosome** : vésicule d'endocytose (généralement de petite taille, inférieure à 200 nm). Le terme peut être défini un peu différemment (voir chapitre 7).
 - **Phagosome** : vésicule de phagocytose, correspondant à l'endocytose de particules biologiques de grande taille (y compris des micro-organismes ou des débris cellulaires) (taille supérieure à 200 nm).
 - **Autophagosome** : vésicule limitée par un saccule de REG déformé renfermant des structures cellulaires vouées à destruction.
- Toutes ces structures fusionnent avec un lysosome primaire qui en digère le contenu, l'ensemble formé étant nommé un lysosome secondaire.

e. La vacuole (ou les vacuoles), compartiment turgescent à rôles multiples (osmose, réserve, recyclage moléculaire, squelette...) [cellules végétales]

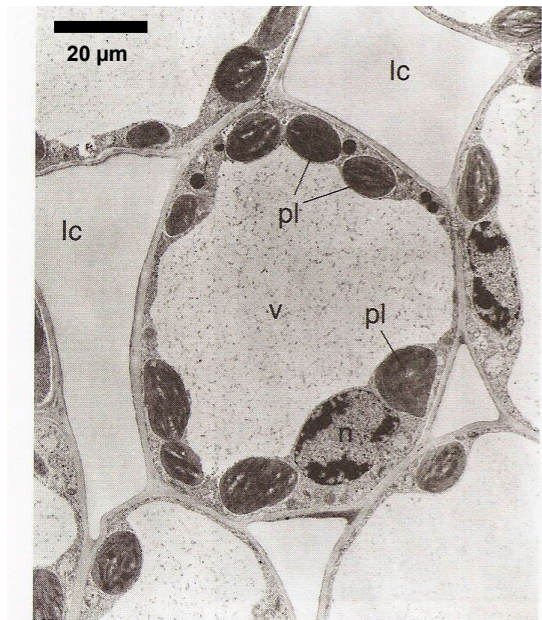
Dans les **cellules peu différenciées** comme les **cellules méristématiques**, le **vacuome** se compose de **nombreuses petites vacuoles** qui fusionneront lors de la différenciation.



▲ FIGURE 20. **La vacuole.** D'après BREUIL (2007), corrigé.

- **Turgescence** : se dit d'une cellule dont le cytoplasme et la membrane plasmique sont plaqués contre la paroi par la vacuole qui exerce une pression (dite de turgescence) ; l'eau a tendance à rentrer par osmose dans la vacuole, milieu hypertonique par rapport au cytosol ou à la paroi. C'est l'état naturel « normal ».
- **Plasmolyse** : se dit d'une cellule dont le cytoplasme est résorbé et dont la membrane plasmique n'exerce de contacts avec la paroi qu'au niveau des plasmodesmes ; l'eau a tendance à sortir par osmose de la vacuole, milieu alors hypotonique par rapport au cytosol et à la paroi. C'est un état anormal. À l'échelle macroscopique, la plante subit un flétrissement.
- **Milieu hypertonique** : se dit d'une solution plus concentrée qu'une autre (par comparaison).
- **Milieu hypotonique** : se dit d'une solution moins concentrée qu'une autre (par comparaison).
- **Milieu isotonique** : se dit d'une solution aussi concentrée qu'une autre (par comparaison).

Voir chapitre 7 (Membranes) + voir TPC



Parenchyme lacuneux.

Tige de Bryone. Cellules chlorophylliennes corticales. n, noyau ; pl, plaste ; v, vacuole ; lc, lacune. Coupe semi-fine colorée au bleu de toluidine, vue en microscopie photonique (Gr. x 400).

▲ FIGURE 21. Cellule du parenchyme foliaire lacuneux d'Angiosperme Eudicotylédone montrant une volumineuse vacuole centrale (MET). D'après ROBERT & ROLAND (1998)

5. Les peroxyosomes, organites de taille vésiculaire assurant le métabolisme des ROS et d'autres réactions, dont une partie de la photorespiration végétale [+ notion de *microbody*]

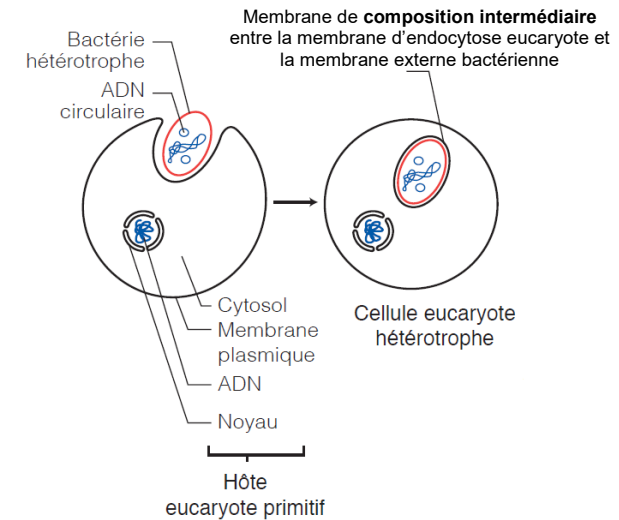
6. Des organites semi-autonomes pluricompartimentés intervenant dans le métabolisme énergétique : mitochondries et plastes

a. Les organites semi-autonomes : organites capables de produire des polypeptides et issus d'une endosymbiose

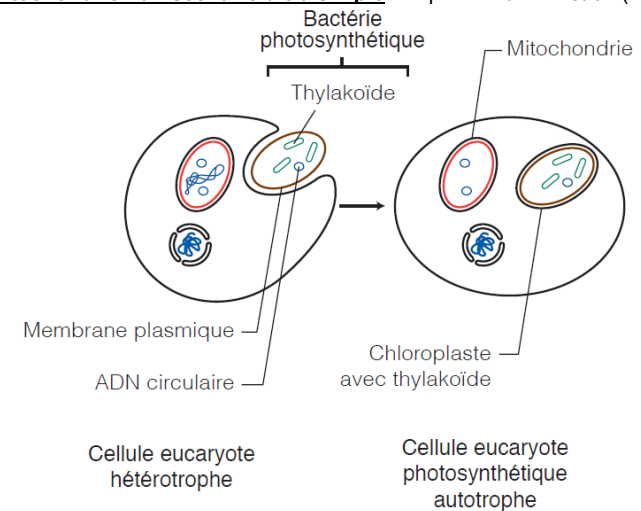
b. L'endosymbiose (primaire ou secondaire) des organites semi-autonomes : arguments et modalités

a. Notion d'endosymbiose et arguments

β. Endosymbiose primaire (cas des mitochondries de tous les Eucaryotes et des plastes de la Lignée verte) vs. endosymbiose secondaire (cas des plastes d'autres lignées)



▲ FIGURE 22. Endosymbiose d'une Protéobactérie (bactérie Gram -) devenue une mitochondrie : un scénario ultra simple. D'après SEGARRA *et al.* (2014)



▲ FIGURE 23. Endosymbiose primaire d'une Cyanobactérie (bactérie Gram -) devenue un plaste : un scénario ultra simple. D'après SEGARRA *et al.* (2014)

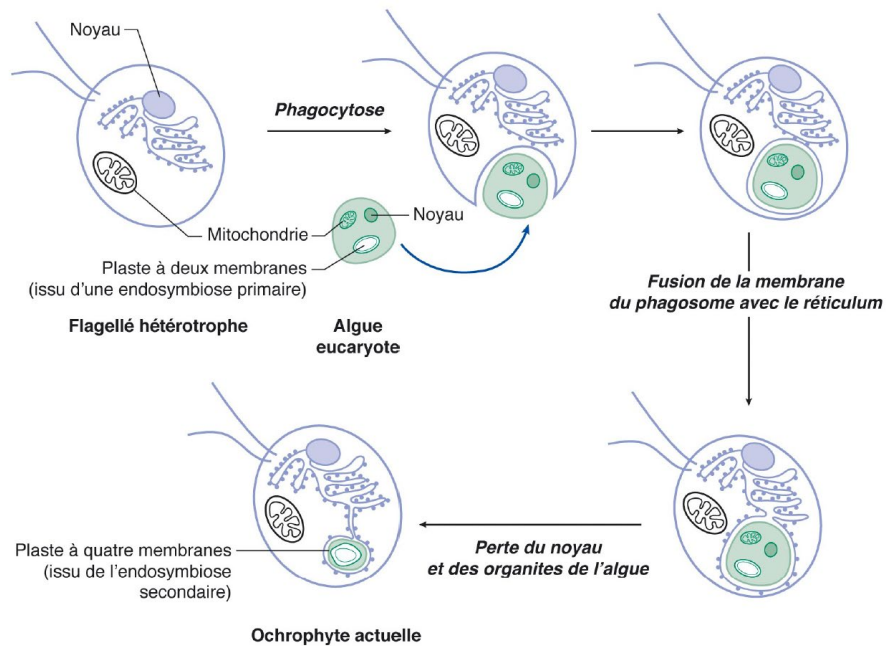
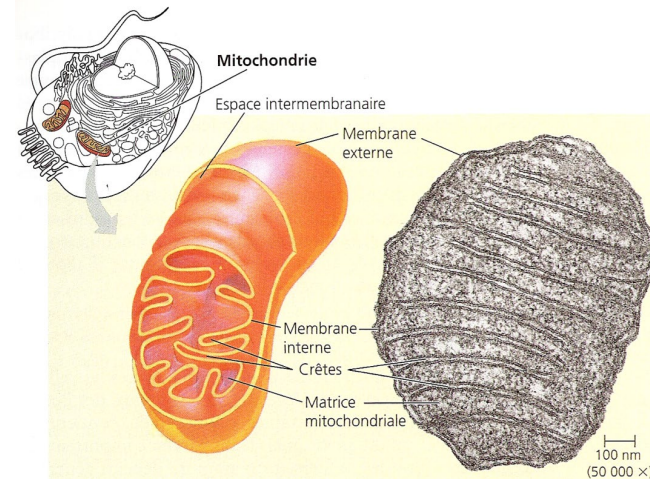


FIGURE 24. Une endosymbiose secondaire : cas des Ochrophytes.
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

c. Les mitochondries, organites assurant la respiration cellulaire et participant à des réactions anaboliques [toutes cellules eucaryotes]

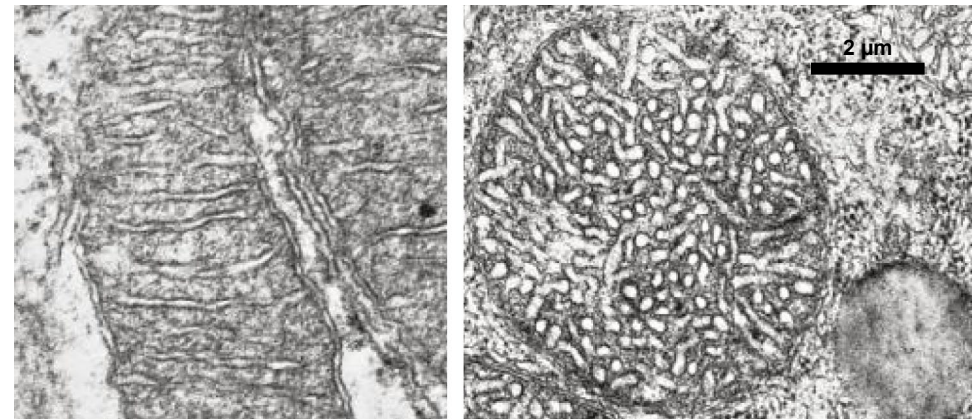
Quelques caractéristiques

- La membrane interne présente de nombreux replis (crêtes mitochondriales) et une quantité importante d'ATP synthases [= ATP synthétases = sphères pédonculées] (enzymes qui produisent l'ATP) ;
- L'espace intermembranaire est très étroit, ce qui permet d'y concentrer facilement des protons H^+ .
- Le compartiment le plus interne s'appelle matrice mitochondriale ; elle contient des inclusions et des ribosomes ;
- Cet organe possède son propre ADN dans la matrice ainsi que des ribosomes (production de quelques protéines ou sous-unités de protéines : la plupart des polypeptides mitochondriaux sont toutefois codés par le génome nucléaire) ;
Exemple chez l'Homme : on trouve seulement 37 gènes codant 22 ARNt, 2 ARNr et 13 ARNm de polypeptides...
- Il y a d'autant plus de mitochondries dans une cellule que celle-ci est active (mobilité, production intense de protéines...).

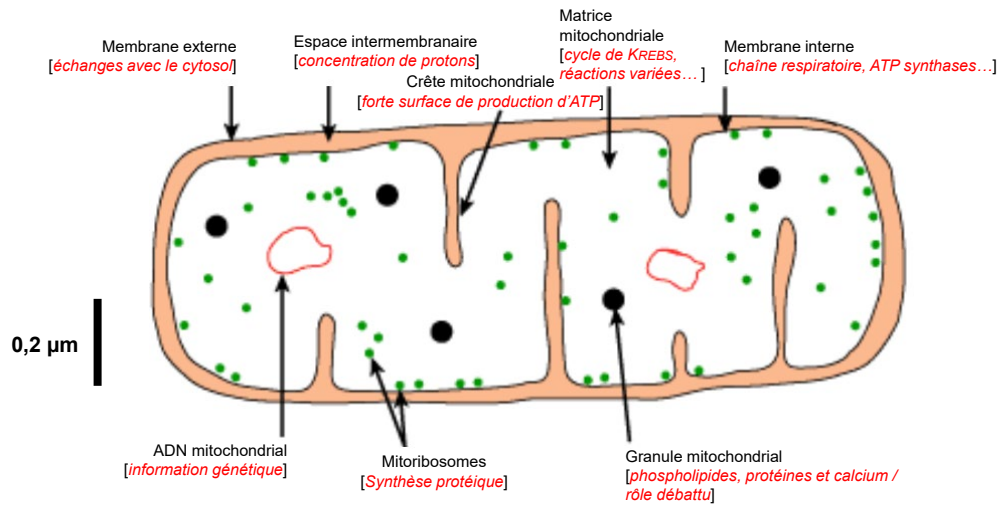


Mitochondrie. La mitochondrie est le site de la respiration cellulaire. Sa double membrane apparaît clairement sur cette illustration et sur cette micrographie électronique (MET). Des crêtes sont formées par les replis de la membrane interne. Celle-ci délimite deux compartiments, comme le fait ressortir le schéma en trois dimensions : l'espace intermembranaire et la matrice mitochondriale.

▲ FIGURE 25. Une mitochondrie. D'après CAMPBELL & REECE (2004).



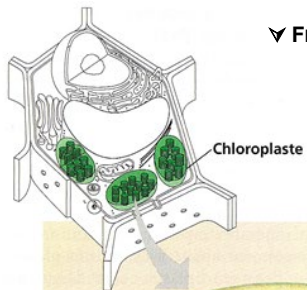
▲ FIGURE 26. Mitochondries en coupes longitudinale (à gauche) et transversale (à droite).
D'après LÜLLMANN-RAUCH & ASAN (2019).



▲ FIGURE 27. **Organisation fonctionnelle d'une mitochondrie.**

Fond de schéma : https://biologie-enligne.univ-lille.fr/biocellulaire/apprendre/chapitre10/ch10_page2.htm (consultation décembre 2021)

d. Les chloroplastes, organites réalisant la photosynthèse [cellules végétales]



▼ FIGURE 28. **Les chloroplastes.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)

Le chloroplaste est le site de la photosynthèse. Comme dans le de la mitochondrie, l'enveloppe qui l'entoure se compose de deux membranes séparées par un espace intermembranaire étroit. La membrane interne retient un liquide, le stroma, dans lequel baigne un troisième compartiment qui possède sa propre membrane, le thylakoïde. Les empilements de sacs aplatis (les thylakoïdes) se nomment grana. Ceux-ci communiquent entre eux au moyen de fins tubules reliant des thylakoïdes (MET).

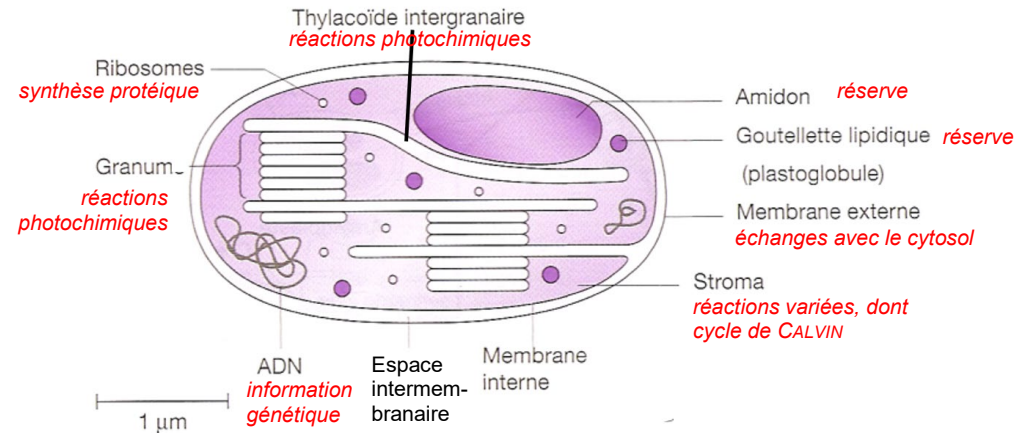
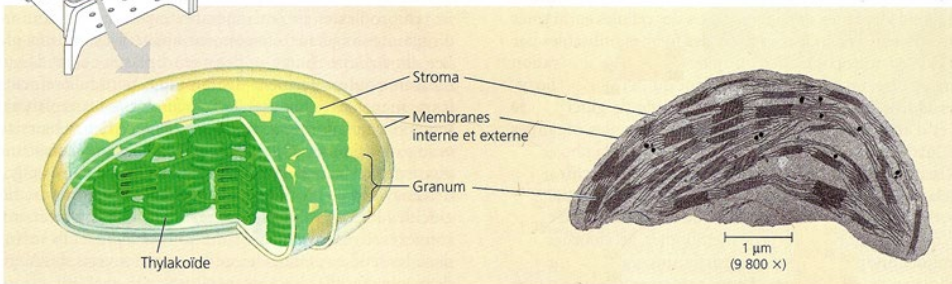
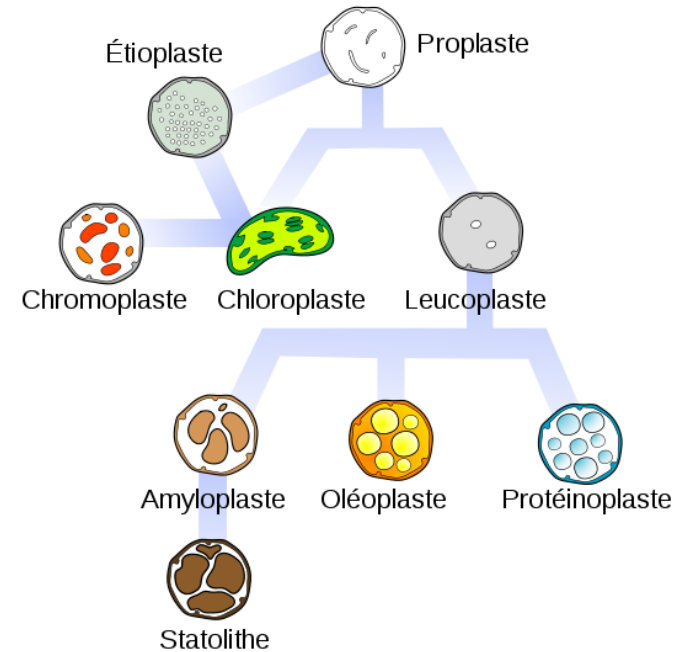


FIGURE 29. **Organisation fonctionnelle d'un chloroplaste chez une Angiosperme.** D'après BREUIL (2007), modifié.

e. L'existence d'autres types fonctionnels de plastides dans des cellules autres que les cellules chlorophylliennes [cellules végétales]

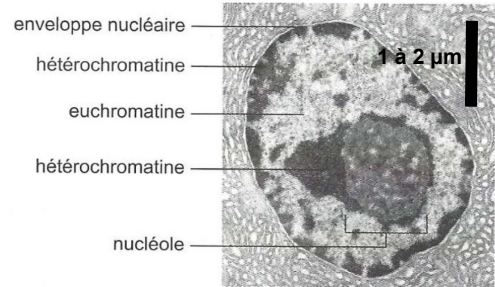
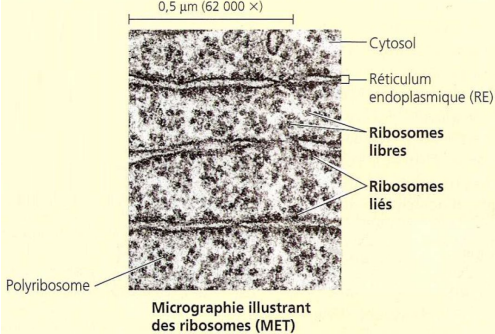
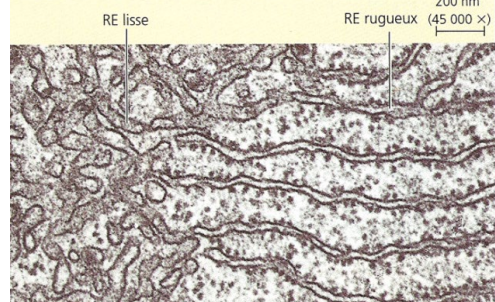


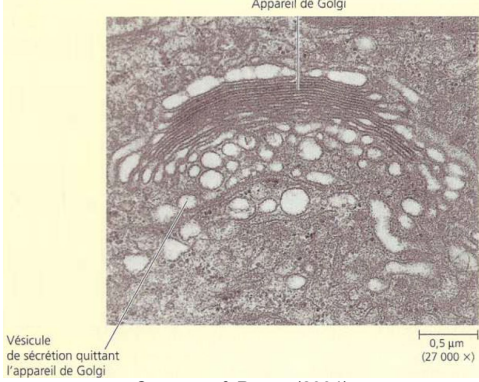
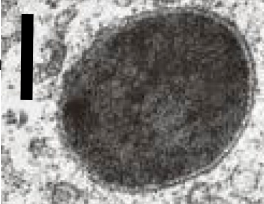
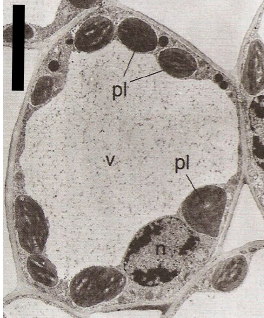
▲ FIGURE 30. **Diversité fonctionnelle des plastides chez les Angiospermes.** Wikipédia (septembre 2015). Le terme de **leucoplaste** (du gr. *leucos*, blanc) renvoie à tous les plastides non pigmentés.

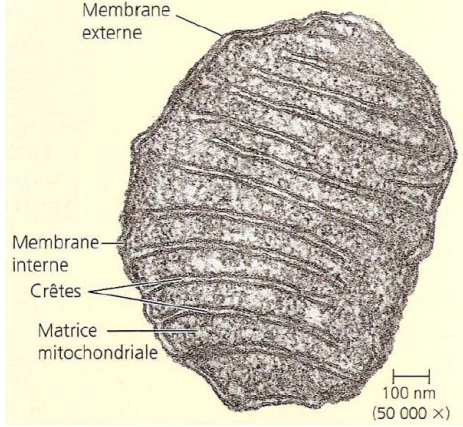
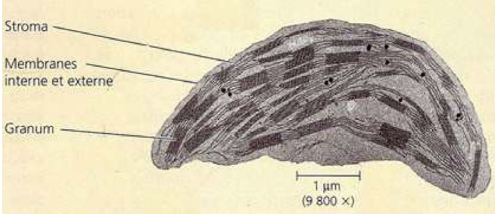
7. Bilan : vue d'ensemble des organites

- Voir le [tableau I](#).

TABLEAU I. Organisation fonctionnelle de la cellule eucaryote : vue d'ensemble.
D'après BREUIL (2007).

Structure cellulaire		Organisation	Fonction	Électronographie (MET)
NOYAU	Enveloppe nucléaire	- Double membrane percée de pores (pas toujours visibles au MET)	- Limitation du noyau (enfermement de l'IG) - Échanges avec le cytosol : ARN, ribosomes, protéines	 <p>enveloppe nucléaire hétérochromatine euchromatine hétérochromatine nucléole</p> <p>PEYCRU <i>et al.</i> (2013)</p>
	Chromatine	- ADN plus ou moins condensé dans le nucléoplasme > euchromatine (<i>très décondensée</i>) + hétérochromatine (<i>relativement condensée</i>)	- Stockage de l'IG - Duplication de l'IG (par réplication de l'ADN) - Expression génétique : transcription (= production des ARN)	
	Nucléole(s)	- Zone très riche en protéines (très sombre au MET) et plutôt ovoïde	- Synthèse des ARNr et assemblage des sous-unités ribosomiques	
CYTOPLASME	Cytosol	- Liquide fondamental de la cellule riches en solutés variés - Contient des ribosomes	- Fonctions variées (nombreuses réactions anaboliques et cataboliques) - Ribosomes : traduction (= synthèse de protéines)	 <p>0,5 µm (62 000 x)</p> <p>Cytosol Réticulum endoplasmique (RE) Ribosomes libres Ribosomes liés Polyribosome</p> <p>Micrographie illustrant des ribosomes (MET) CAMPBELL & REECE (2004)</p>
	Réticulum endoplasmique granuleux (REG)	- Sacculles de section constante (sacculle en coupe : 2 membranes rapprochées) et espacés régulièrement , portant de nombreux ribosomes liés	- [Fabrication et] maturation des protéines membranaires et des protéines destinées à la sécrétion	 <p>200 nm (45 000 x)</p> <p>RE lisse RE rugueux</p> <p>CAMPBELL & REECE (2004)</p>
	Réticulum endoplasmique lisse (REL)	- Réseau de tubules (tubule en coupe : forme ovoïde ou tubulaire) et dépourvues de ribosomes liés	- Synthèse de lipides variés : phospholipides, cholestérol, stéroïdes... - Stockage de calcium (calciosome)	

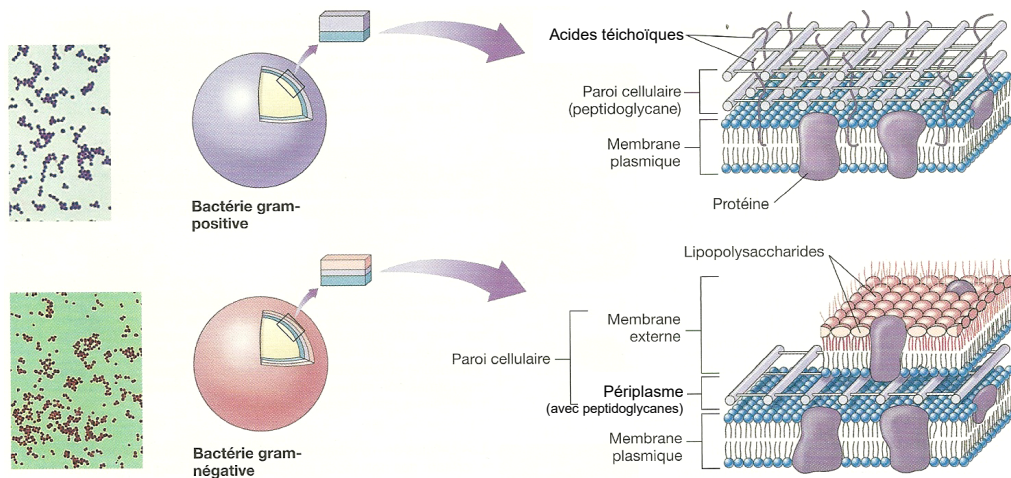
<p>Appareil de GOLGI (dictyosomes)</p>	<p>- Sacculs fins et très rapprochés + vésicules (vésicule : petit compartiment cellulaire sphérique)</p>	<p>- Tri et modification des protéines membranaires et destinées à la sécrétion</p>	 <p>CAMPBELL & REECE (2004)</p>
<p>Lysosomes <i>[c. animales]</i></p>	<p>- Compartiments ovoïdes difficiles à caractériser sur le plan ultrastructural - pH acide, riches en enzymes hydrolytiques</p>	<p>- Digestion des déchets cellulaires, des organites endommagés et du contenu des endosomes (voire phagosomes)</p>	<p>100 nm</p> 
<p>Vacuole <i>[c. végétales]</i></p>	<p>- Compartiment très grand et souvent unique (<i>sauf cellules méristématiques : multiples petites vésicules</i>)</p>	<p>- Gestion / recyclage des déchets cellulaires - Turgescence - Homéostasie cellulaire et tampon ionique - Stockage de pigments hydrophiles - Stockage de métabolites variés : saccharose, acide malique...</p>	<p>20 μm</p>  <p>ROBERT & ROLAND (1998a)</p>
<p>Péroxyosomes</p>	<p>- Allure de vésicules</p>	<p>- Gestion des ROS (<i>reactive oxygen species</i>) - Voies métaboliques variées, exemple : photorespiration chez les plantes</p>	<p>[Allure de vésicule ; granulations et caractère foncé ou clair variables]</p>

<p>Mitochondries [organite semi-autonome : origine endosymbiotique]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Double membrane (enveloppe) - Membrane interne avec des crêtes riches en sphères pédonculées - Présence d'ADN (rarement visible au MET) et de ribosomes dans la matrice 	<p>- Respiration cellulaire : production d'ATP par oxydation de matière organique</p>	 <p>CAMPBELL & REECE (2004)</p>
<p>Chloroplastes [c. végétales chlorophylliennes] [organite semi-autonome : origine endosymbiotique]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Double membrane (enveloppe) - Présence de saccules nommés thylakoïdes, localement empilés en grana - Présence d'ADN (rarement visible au MET) et de ribosomes dans le stroma - Inclusions, notamment amidon et gouttelettes lipidiques 	<p>- Photosynthèse : production de matière organique à partir de matière minérale et de lumière</p>	
<p>Existence d'autres plastes dans d'autres cellules végétales : proplastés, amyloplastés, chromoplastés...</p>			

C. Une organisation des cellules bactériennes notamment caractérisée par une compartimentation faible

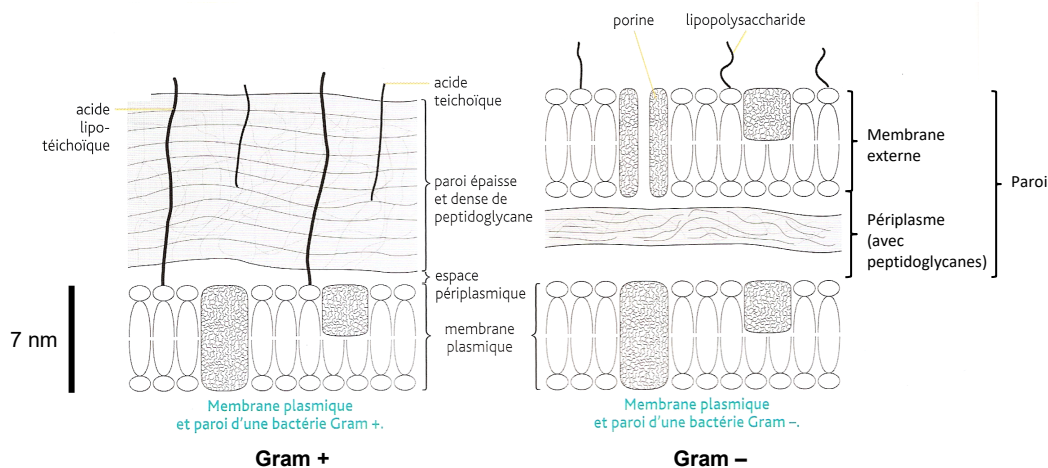
1. Une membrane plasmique, une paroi et d'éventuelles expansions

- a. Une membrane plasmique semblable à celle des Eucaryotes
- b. Une paroi à rôle squelettique de deux types : **GRAM +** et **GRAM -**



La coloration de Gram. L'assise de peptidoglycane entourant les bactéries gram positif fixe le colorant crystal violet et les bactéries deviennent pourpres dans un frottis après l'application de la coloration de Gram (du nom de Hans Christian Gram, qui a mis au point cette technique). Possédant beaucoup moins de peptidoglycane (localisé entre la membrane plasmique et une membrane externe), les bactéries gram-négatives ne fixent pas le crystal violet et laissent apparaître le colorant rouge de fond (généralement la safranine).

▲ **FIGURE 31. Types de parois bactériennes.** D'après RAVEN *et al.* (2007), corrigé.



▲ **FIGURE 32. Bactéries GRAM + et -.** D'après BOUTIN *et al.* (2015), modifié.

Encadré B Les porines, des protéines de la membrane externe des Bactéries Gram – (et des mitochondries et plastes)

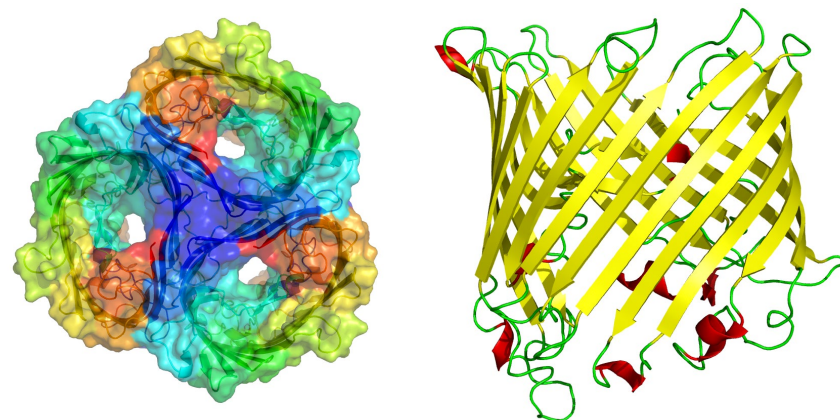


FIGURE a. Vue dorsale d'une porine montrant sa structure trimérique (à gauche) et vue latérale d'un protomère mettant en évidence le tonneau bêta (à droite).
D'après Wikipédia (septembre 2015)

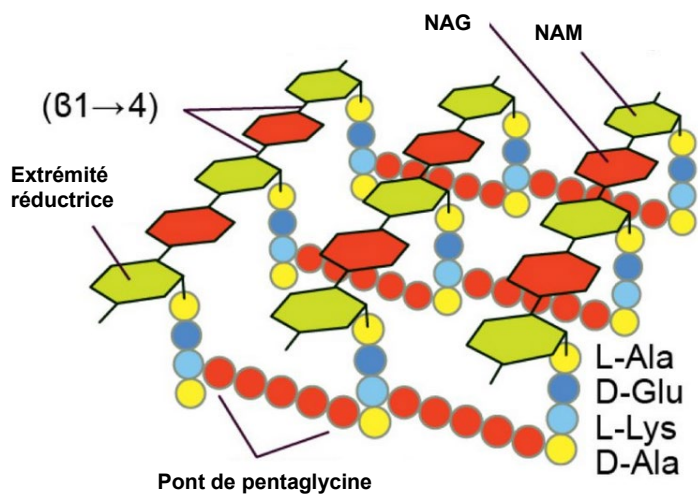
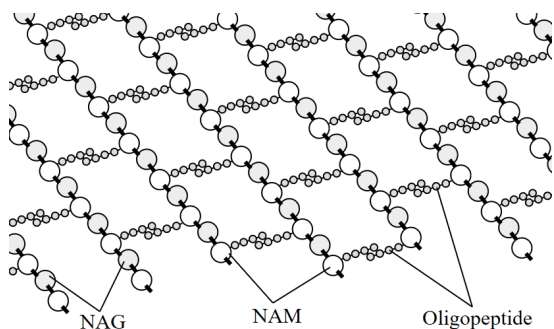
- Les **porines** sont des **protéines transmembranaires formant des canaux permettant la diffusion de petites molécules hydrophiles à travers la membrane externe des cellules bactériennes de type Gram –**; on les trouve aussi au niveau de la **membrane externe des mitochondries et des plastes**, ce qui est encore un **argument** en faveur de l'**origine endosymbiotique** de ces organites.
- Les **porines** sont des **protéines de structure quaternaire constituées de trois protomères qui sont des canaux cylindriques accolés**. Chaque canal est lui-même constitué de **tonneaux bêta**, **regroupements circulaires de feuillet bêta plissés** (figure a).
C'est tout à fait singulier pour une protéine transmembranaire : en effet, la **plupart des autres protéines transmembranaires connues** présentent des **hélices alpha** dans leurs portions transmembranaires et **non des feuillet bêta** comme les porines.
- Les **porines** permettent le passage d'ions et de petites molécules organiques dans les deux sens au travers de la membrane externe. Elles sont généralement peu sélectives.

Focus sur les peptidoglycanes (limite programme) [gel hydraté : résistance aux forces de compression, mais aussi à la tension] [tous Gram]

- Les **peptidoglycanes** = la **muréine** = le **mucocomplexe** = les **mucopeptides** de la paroi des Eubactéries (figure 33) des **polymères glucidiques reliés par des ponts peptidiques**. Le **squelette glucidique** est composé d'un **polymère d'acétylglucosamine (NAG) et d'acide N-acétyl-muramique (NAM) liés par des liaisons β1-4**, ce qui garantit la **linéarité** de la molécule. Deux **polysaccharides** sont liés au niveau des NAM par des **ponts peptidiques, courts peptides pouvant être constitués de différents types d'acides aminés (alanine, glutamate...)**.

Les **peptidoglycanes** sont des **substances gélifiantes qui font de nombreuses liaisons avec l'eau ; ils constituent l'essentiel de la paroi bactérienne** qui assure une **protection mécanique** mais aussi maintient la **forme de la cellule**, la protégeant des chocs osmotiques.

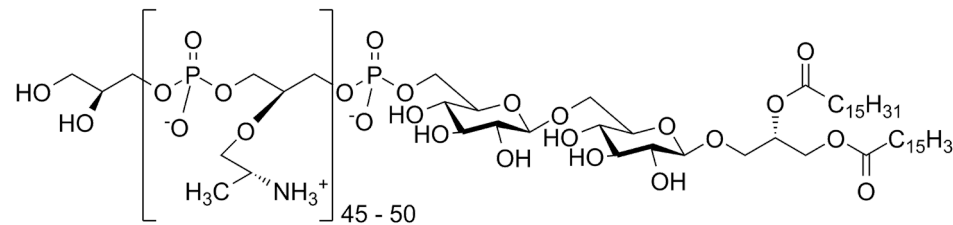
Ce sont les **peptidoglycanes** qui expliquent la façon dont agit la **coloration de GRAM**. Les **Gram +** ont une **paroi plus épaisse** que les **Gram -** et **non recouverte d'une membrane externe** comme les **Gram -** ; les **différences de coloration** en découlent.



▲ FIGURE 33. **Peptidoglycanes : deux représentations [limite programme]**.
Wikipédia (août 2015) et DSM (novembre 2021).

Focus sur les acides téichoïques (limite programme) [résistance aux forces de tension, avec tolérance d'une petite élasticité] [Gram +]

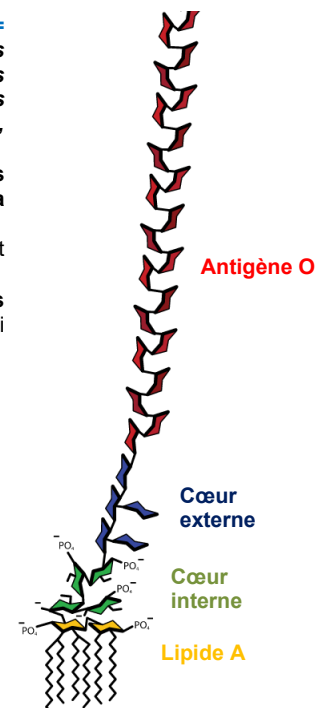
- L'**acide téichoïque** est un **composé linéaire de phosphates associés au glycérol ou au ribitol (un pentose)**. Son caractère ionisé négatif lui permet d'attirer des cations (calcium, potassium).
- Les **acides téichoïques ancrés (de manière covalente) dans la membrane** sont appelés **acides lipotéichoïques (LTA, lipoteichoic acids)** (figure 34) alors que les **acides téichoïques liés (de manière covalente) aux peptidoglycanes** sont nommés **acides téichoïques pariétaux (WTA, wall teichoic acids)**. Bien entendu, ils peuvent être les deux à la fois.



▲ FIGURE 34. **Un acide lipotéichoïque (LTA) [hors programme]**.
D'après Wikipédia (décembre 2021).

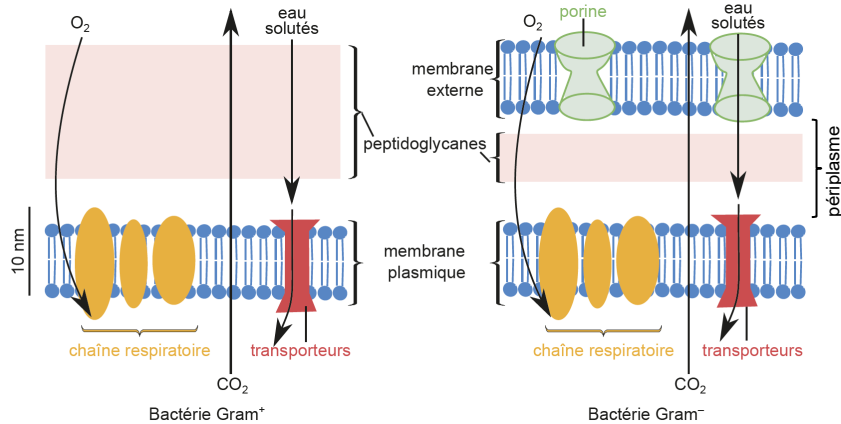
Focus sur les lipopolysaccharides (LPS) (limite programme) [défense + peut-être adhérence, reconnaissance...] [Gram -]

- Les **lipopolysaccharides (LPS) [= lipoglycanes = endotoxines]** sont des **lipides complexes (nommés lipides A : di-glucosamine porteur de multiples acides gras) couplés à des chaînes polysaccharidiques (noyau oligosaccharidique, antigène O polysaccharidique)** (figure 35).
- Ils sont **propres à la membrane externe** des Bactéries **GRAM -** mais sont **synthétisés dans la membrane interne** avant translocation.
- On pense que leur **rôle** est surtout **défensif**, constituant des **toxines** pour de nombreux **Eucaryotes**.
- Des interventions dans l'**adhérence entre Bactéries** dans les **biofilms** ou leur **reconnaissance** ont aussi été **suggérées** par certains travaux.

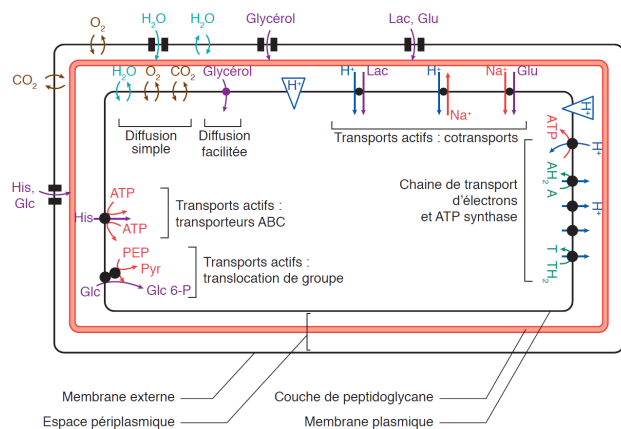


► FIGURE 35. **Un LPS [limite programme]**.
D'après Wikipédia (décembre 2021).

c. Des échanges autorisés par la membrane et la paroi, ainsi que la respiration cellulaire



▲ FIGURE 36. Transferts au niveau des surfaces limitantes d'une Bactérie.
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021), modifié.

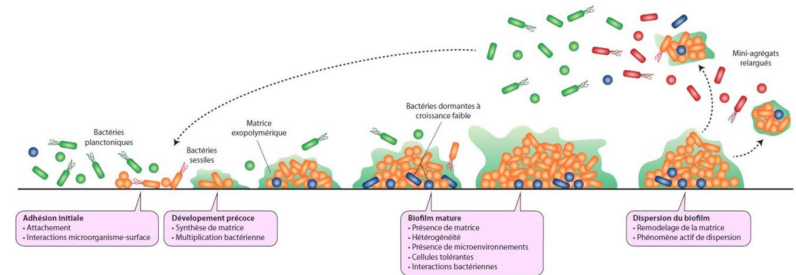


Les modalités de traversée de la membrane plasmique sont très diverses et illustrées sur la figure.

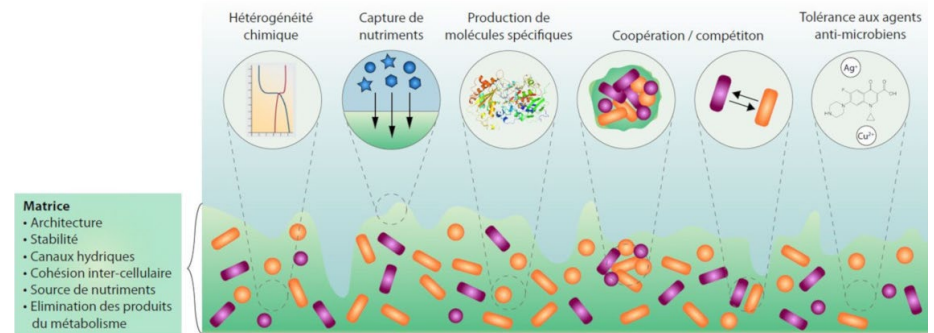
Seuls quelques exemples ont été donnés par catégorie de biomolécules.
Abréviations des glucides:
Gal: galactose; Glc: glucose; Glc-6P: glucose 6 phosphate; Lac: lactose
Abréviations des acides aminés:
Glu: glutamate; His: histidine
Abréviations d'autres constituants:
T/TH2: transporteur d'électrons oxydé/réduit; A/AH2: accepteur d'électrons oxydé/réduit
ATP: adénosine tri-phosphate; PEP: phospho-énol-pyruvate; Pyr: pyruvate

▲ FIGURE 37. Principaux transferts de matières chez *E. coli* [pour information].
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

d. L'existence possible d'une expansion de la paroi (capsule, mucilages...) et la capacité de former des biofilms



▲ FIGURE 38. La formation d'un biofilm [pour information].
<https://www.encyclopedie-environnement.org/sante/biofilms-bacteriens/>
(consultation décembre 2021).



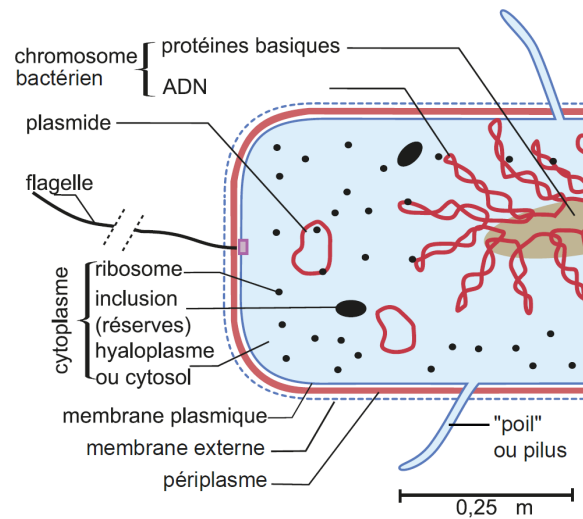
▲ FIGURE 39. La dynamique d'un biofilm : intérêts pour les protagonistes [pour information].
<https://www.encyclopedie-environnement.org/sante/biofilms-bacteriens/>
(consultation décembre 2021).

2. Une compartimentation faible à inexistante

a. L'absence fréquente de système endomembranaire chez les Eubactéries, mais une ébauche de compartimentation chez les Gram – liée au périplasm

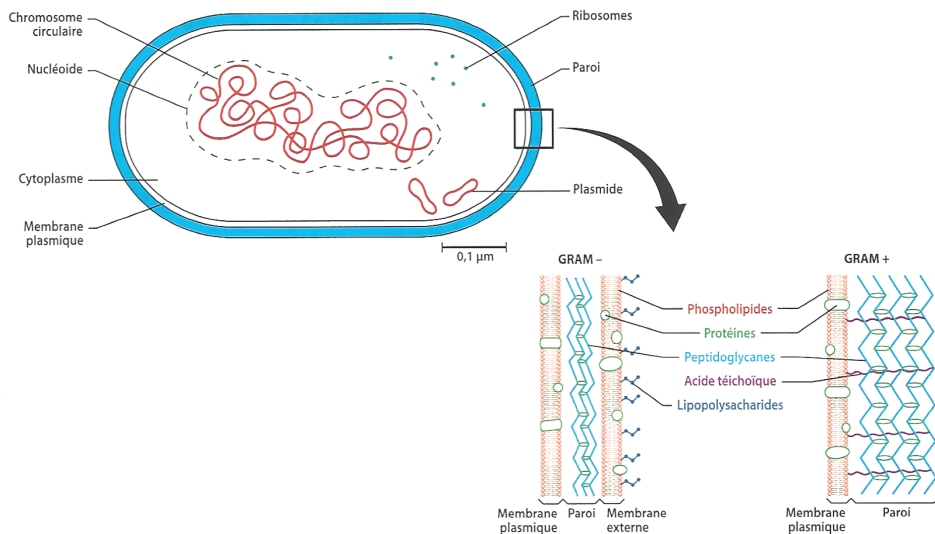
b. Un cytoplasme généralement monocompartmenté comprenant du cytosol, des ribosomes, des inclusions et l'information génétique

c. La présence de thylakoïdes chez les Cyanobactéries

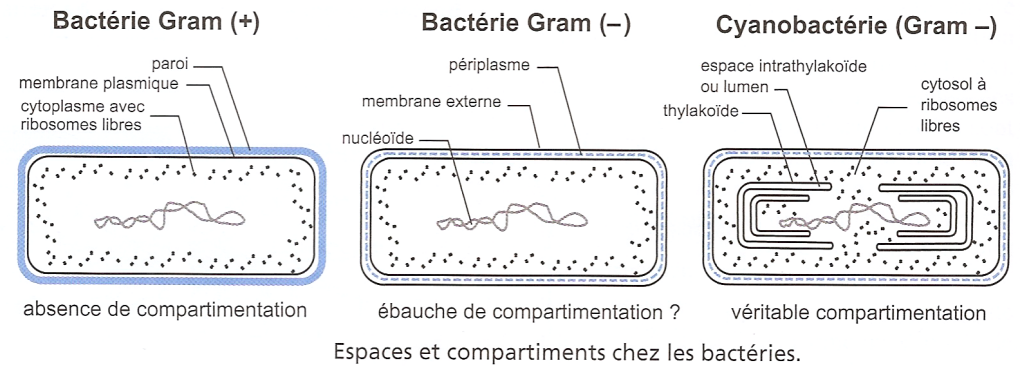


▲ FIGURE 40. Organisation de base d'une Bactérie Gram – typique (*Escherichia coli*, *Rhizobium leguminosarum*).
D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021), modifié / corrigé.

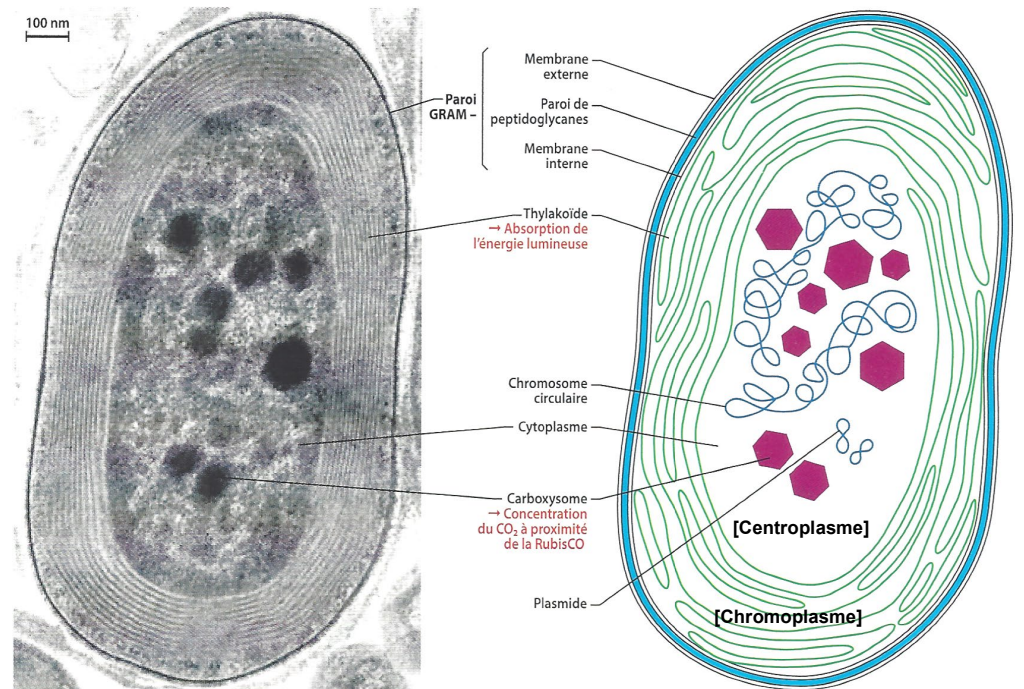
Contrairement à ce que laisse à penser cette image, les pili ne sont absolument pas des expansions de la membrane plasmique mais des structures protéiques polymérisées tubulaires.



▲ FIGURE 41. Organisation simplifiée d'une Bactérie.
D'après DAUTEL et al. (2021).

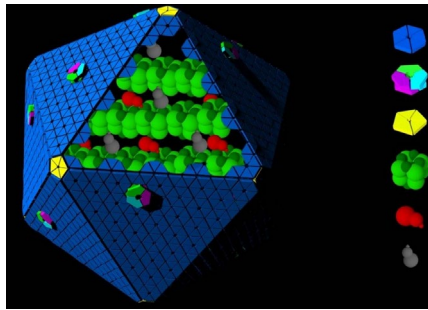


▲ FIGURE 42. De la compartimentation chez les Bactéries ? Structure fondamentale.
D'après PEYCRU et al. (2010a).



Une cyanobactérie observée au MET : un exemple de bactérie compartimentée.

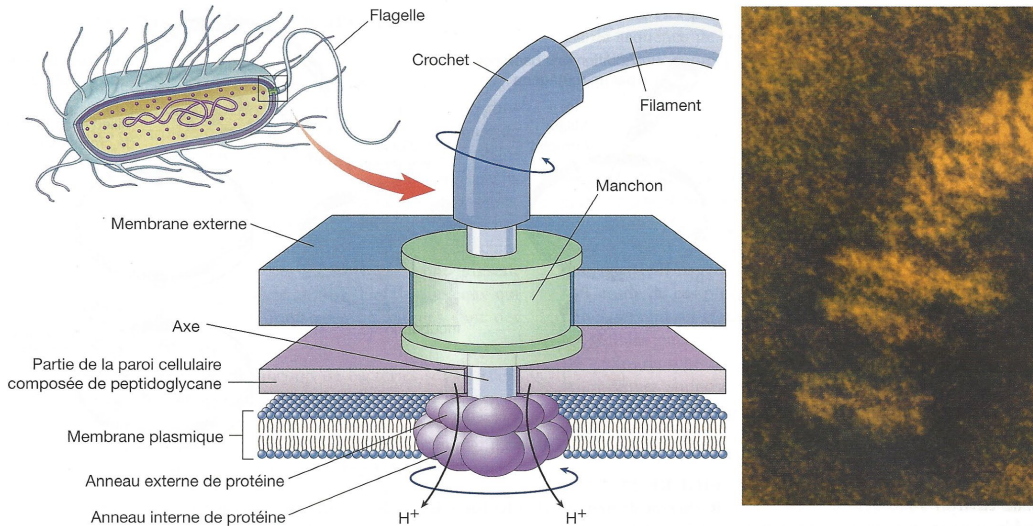
▲ FIGURE 43. Organisation d'une Cyanobactérie. D'après PEYCRU et al. (2010a).



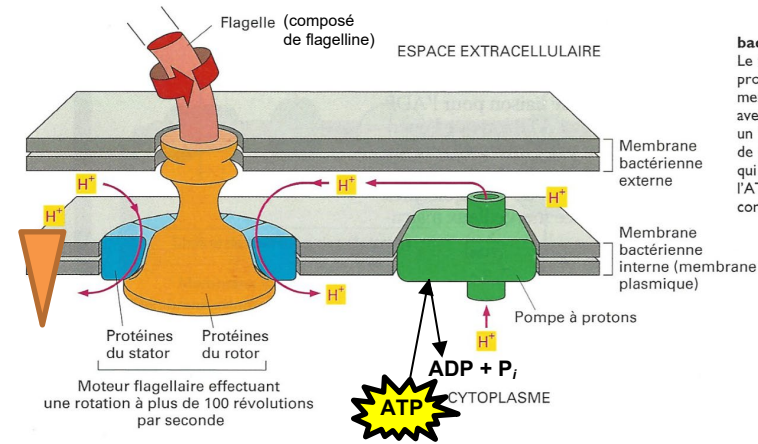
- BMC-H (hexamer) [limitation]**
 - BMC-T (tandem) [échanges]**
 - BMC-P (pentamer) [sommets]**
 - RuBisCO (ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase oxydase) [fixation du CO₂]**
 - Anhydrase carbonique [équilibre CO₂ / HCO₃⁻]**
 - Autres protéines de cœur**
- Protéines BMC [Bacterial Microcompartments] [coque protéique]

▲ FIGURE 44. **Modèle d'organisation d'un carboxysome [pour information].**
<https://www.kerfeldlab.org/images.html> (consultation décembre 2021).
 Document R. GONZÁLEZ, S. AXEN & C. KERFELD

3. La présence possible d'expansions (pili, flagelles bactériens)



Moteur flagellaire d'une bactérie gram-négative. Un filament protéique, composé de flagelline, est attaché à un axe protéique qui traverse un manchon dans la membrane externe et un orifice dans l'assise de peptidoglycane jusqu'à des anneaux protéiques fixés à la paroi cellulaire et à la membrane plasmique, comme des anneaux de roulements à billes. L'axe tourne quand l'anneau protéique interne attaché à l'axe se déplace par rapport à l'anneau externe fixé à la paroi cellulaire. L'anneau interne est un canal ionique H⁺, une pompe à protons qui se sert du passage des protons dans la cellule pour alimenter le mouvement de l'anneau interne par rapport à l'externe.



Rotation du flagelle bactérien actionnée par le flux de H⁺. Le flagelle est fixé sur une série d'anneaux protéiques (orange), qui sont inclus dans les membranes externe et interne et tournent avec le flagelle. La rotation est actionnée par un flux de protons à travers un anneau externe de protéines (le stator) selon des mécanismes qui pourraient ressembler à ceux utilisés par l'ATP synthase, même s'ils ne sont pas encore compris.



▲ FIGURE 45. **Flagelle bactérien (ici chez une GRAM -).**
 D'après RAVEN *et al.* (2007) et ALBERTS *et al.* (2004).

D. Une information génétique dans chaque cellule

Voir les **chapitres de génétique**

- 1. Chez les Eucaryotes : une information génétique compartimentée, scindée en une composante principale nucléaire et une composante mineure dans les organites semi-autonomes**
- 2. Chez les procaryotes : une information génétique cytoplasmique scindée en une composante principale, le chromosome bactérien (dans le nucléoïde), et une composante mineure fréquente, les plasmides**

▼ TABLEAU II. **Comparaison des génomes eucaryotes et eubactériens.**

Inspiré de PEYCRU *et al.* (2013).

pb = paire de base (correspond à une paire de nucléotides). L'unité accepte les préfixes multiplicateurs : 10³ pb = 1 kb (kilobase), 10⁶ pb = 1 Mb (mégabase), 10⁹ pb = 1 Gb (gigabase). ADNmt = ADN mitochondrial.

	Localisation	Organisation de l'ADN	Nombre de molécules d'ADN	Taille du génome	Séquences répétées non codantes	Structure des gènes
Eucaryotes	Noyau (génome nucléaire)	Linéaire	Plusieurs différentes (état souvent dominant : diploïdie)	Élevée : généralement de 10 ⁶ à 10 ¹¹ pb Homme : 3,2 × 10 ⁹ pb (cas de certaines 'amibes' : 10 ¹¹ à 10 ¹² !!)	Proportion souvent élevée Homme 50 % du génome (mais peut tomber à quelques % chez certaines espèces)	Introns + exons (gènes morcelés) Quelques espèces avec très peu d'introns (ex. levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>)
	Organites semi-autonomes (génome extra-nucléaire)	Circulaire	1 en plusieurs copies Mitochondrie humaine : 1 à 15 copies, souvent 5	Petite : de 10 ⁴ à 10 ⁶ pb ADNmt humain : 16,6 × 10 ³ pb	Proportion nulle ou faible	Pas d'introns Quelques gènes avec introns auto-épissables chez certaines espèces
Bactéries	Cytoplasme : chromosome bactérien (dans nucléoïde)	Souvent circulaire (linéaire chez quelques espèces)	1 (très rarement plusieurs)	Moyenne : de 10 ⁶ à 10 ⁷ pb <i>E. coli</i> : 4,64 × 10 ⁶ pb <i>Rh. leguminosorum</i> : 7,79 × 10 ⁶ pb (Mycoplasmes : 10 ⁵ pb)	Proportion nulle	Pas d'introns
	Cytoplasme : Plasmides (génome extra-chromosomique)	Circulaire	Nombre variable	Très petite : 10 ³ à 10 ⁵ pb (en moyenne quelques milliers de pb)	Proportion nulle	Pas d'introns

II. Des cellules organisées par un squelette interne dynamique qui intervient dans leur fonctionnement : le cytosquelette

Capacités exigibles

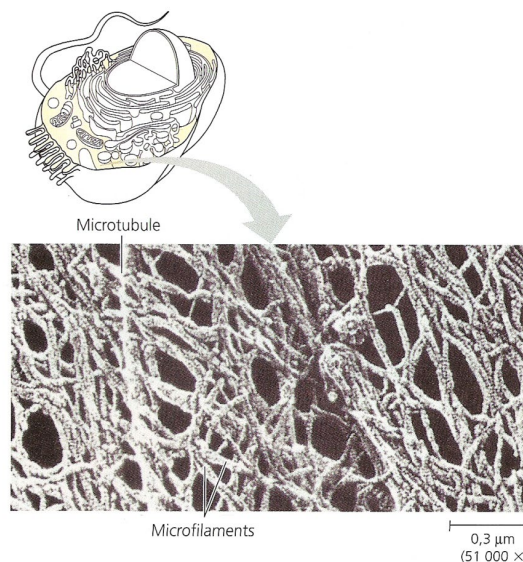
✓ Illustrer les rôles du cytosquelette sur l'exemple de l'entérocyte et de la cellule du parenchyme palissadique (par exemple : association aux jonctions, structuration de l'enveloppe nucléaire, structuration des microvillosités, flux vésiculaires, cyclose des chloroplastes).

A. Le cytosquelette eucaryote : un réseau protéique impliqué dans la structuration et le fonctionnement cellulaires

Il s'agit d'un édifice supramoléculaire.



Attention, le rôle de **squelette cellulaire** (au sens du maintien de la forme globale de la cellule) n'est **pas toujours assuré par le cytosquelette** : si c'est le **cas des cellules animales**, c'est peu vrai pour les **cellules végétales** (ou les **cellules bactériennes**) où c'est la **paroi** (donc la **matrice**) qui remplit le **rôle squelettique**.



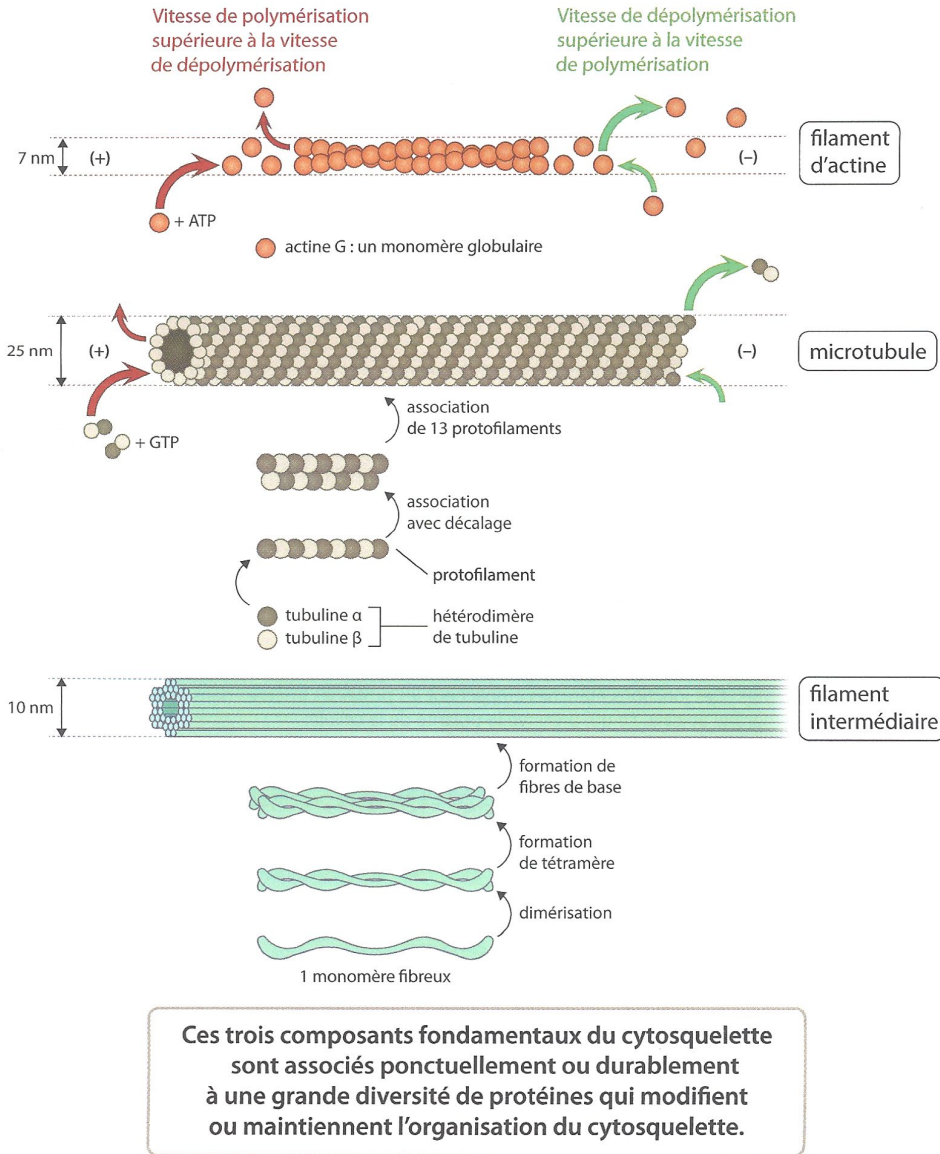
Cytosquelette. Cette micrographie électronique, réalisée après ombrage de l'échantillon, montre deux constituants du cytosquelette : les microtubules et les microfilaments. Les troisièmes constituants, les filaments intermédiaires, n'apparaissent pas ici.

▲ FIGURE 46. **Le cytosquelette (MEB).** D'après CAMPBELL & REECE (2004).

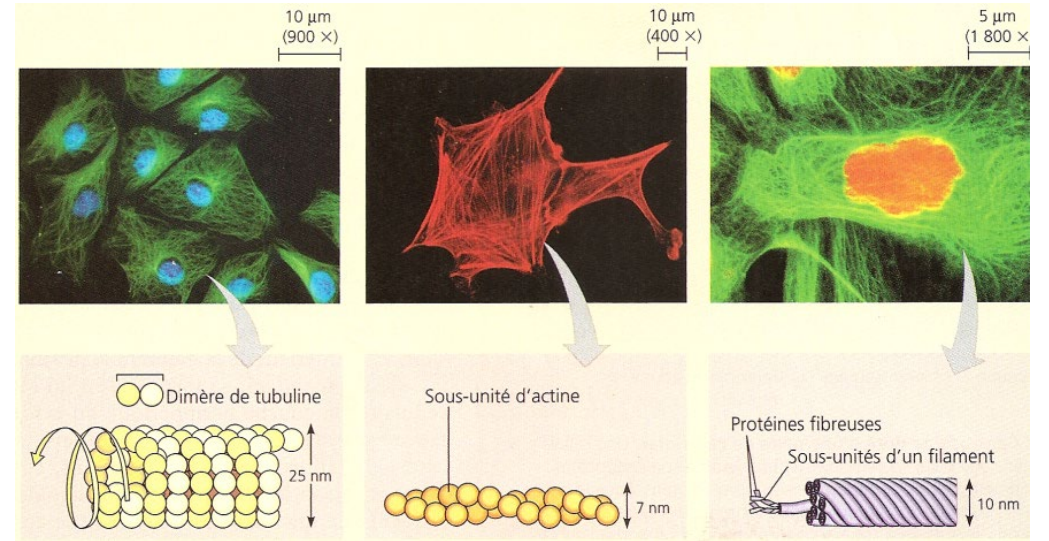
Bilan (adapté du programme)

- ✓ La **cellule eucaryote** est **compartmentée**, ce qui entraîne une **régionalisation des fonctions** et une **coopération des compartiments** dans le **fonctionnement cellulaire**. Le **support de l'information génétique** est présent dans **plusieurs compartiments** cellulaires.
- ✓ La **cellule bactérienne** contient un **chromosome unique circulaire** et éventuellement des **plasmides**. Elle est délimitée par une ou deux **membranes** et une paroi de **peptidoglycanes**. Son **cytoplasme** est souvent **peu compartimenté**.

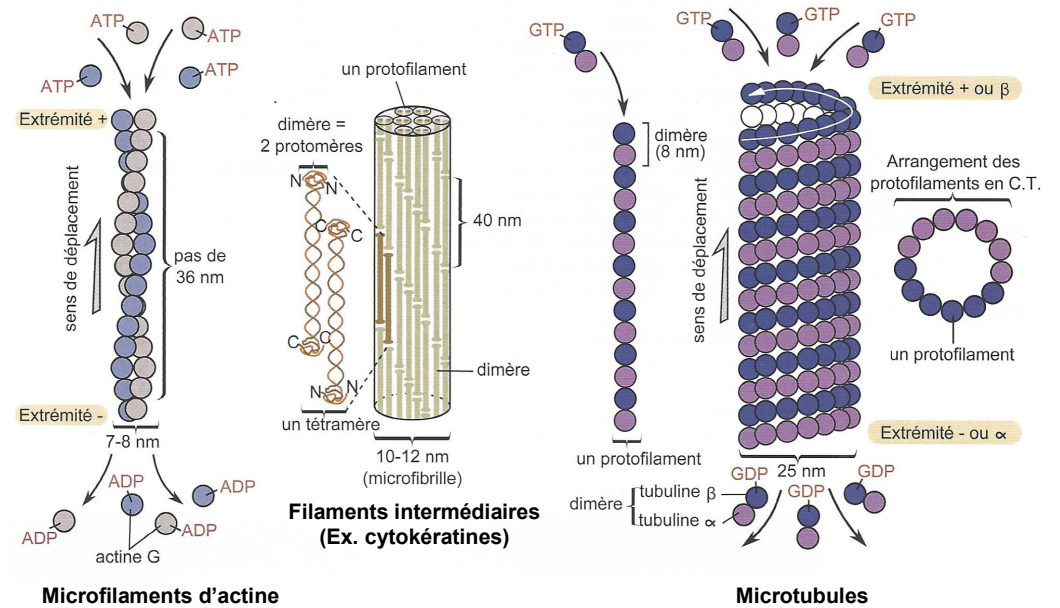
1. Une armature protéique en réseau à localisation surtout cytosolique : trois types de constituants principaux en interaction avec des protéines associées



▲ **FIGURE 47. Constituants du cytosquelette : vue d'ensemble 1.** D'après DAUTEL *et al.* (2017), légèrement adapté.



▲ **FIGURE 48. Constituants du cytosquelette : vue d'ensemble 2.** D'après CAMPBELL & REECE (2004).



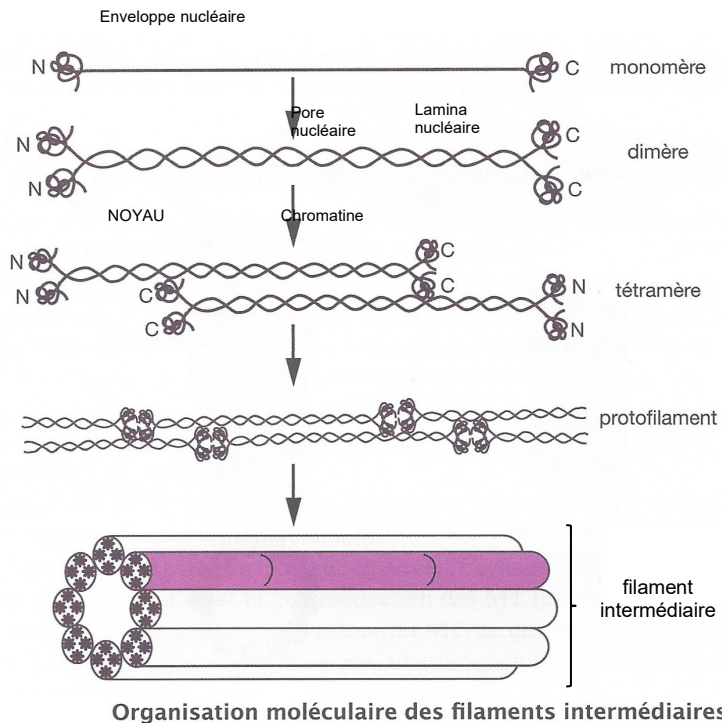
▲ **FIGURE 49. Constituants du cytosquelette : vue d'ensemble 3.** D'après PEYCRU *et al.* (2013).

a. Les éléments de cytosquelette (*stricto sensu*) : trois grands types de constituants

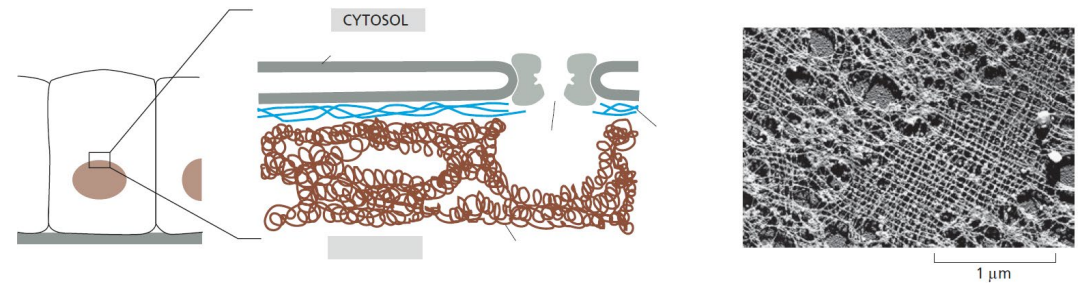
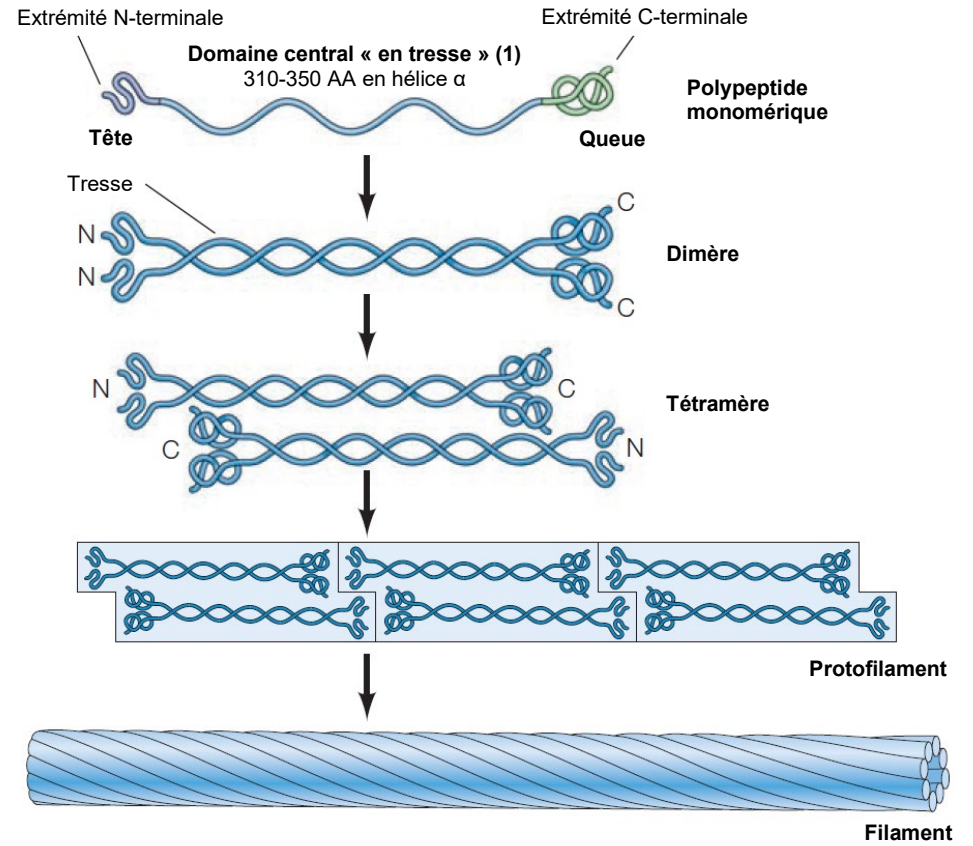
α. Les microtubules (MT) : des filaments cylindriques creux et orientés, composés de treize protofilaments de dimères de tubulines α-β

β. Les filaments intermédiaires (FI) : des composés protéiques variés typiquement assemblés en dimères / tétramères / protofilaments / filaments [non orientés]

Ce sont des **assemblages (non covalents) d'unités protéiques fondamentales fibrillaires (formées d'une grande hélice alpha) aux extrémités globulaires** ; ces **protomères** s'assemblent **par deux**, formant des **dimères**, qui eux-mêmes s'associent **par paires antiparallèles légèrement en décalage**, formant ainsi des **tétramères**. Ces **tétramères s'alignent bout-à-bout** en **protofilaments**. **Huit protofilaments s'assemblent** enfin en **microfibrilles (= filaments intermédiaires)**.



▲ FIGURE 51. **Modèle d'organisation d'un filament intermédiaire (type standard, comme la kératine).** D'après BOUJARD *et al.* (2015).

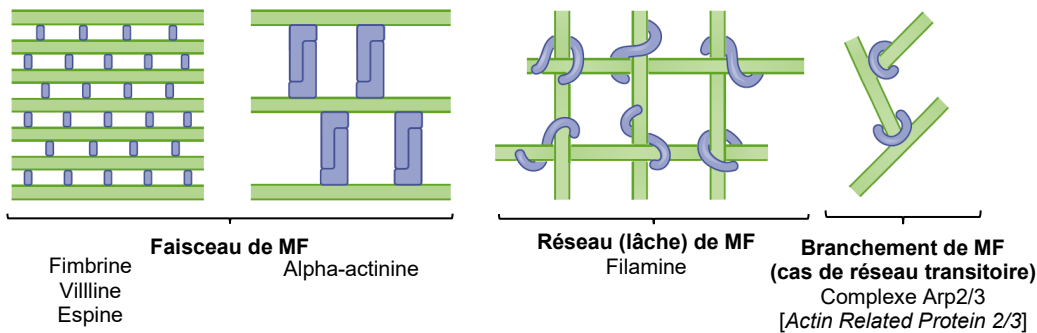


Les **lamines nucléaires** sont en réalité de **plusieurs types (lamines A, B et C, associées par des protéines variées à l'enveloppe nucléaire d'une part et à la chromatine d'autre part.** Leur rôle dans de **nombreux processus (transcription, réplication...)** est un champ d'étude dynamique et proluxe.

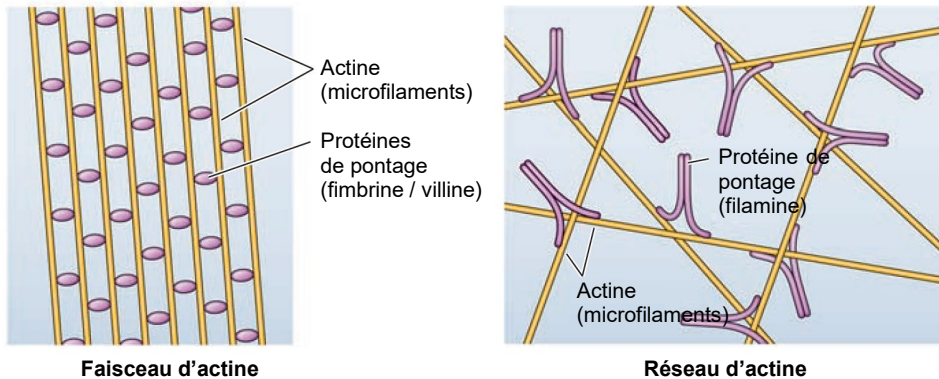
γ. Les microfilaments (MF = μM) d'actine : deux chaînes torsadées orientées (actine filamenteuse = actine F) composées d'actine globulaire (actine G)

b. Les protéines accessoires (= annexes = associées) du cytosquelette : une grande diversité d'agents protéiques interagissant avec le cytosquelette

α. Les protéines de pontage : des protéines assurant l'association des éléments de cytosquelette en faisceaux ou en réseau

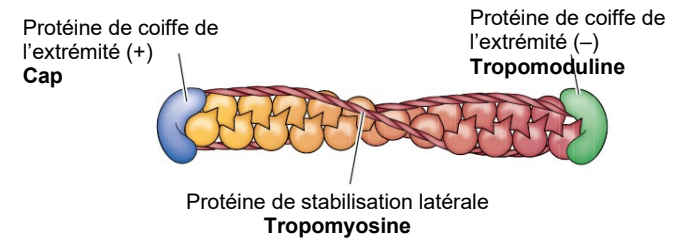


▲ FIGURE 53. **Protéines de pontage et organisation des microfilaments d'actine.** D'après LÜLLMANN-RACUH & ASEN (2019).

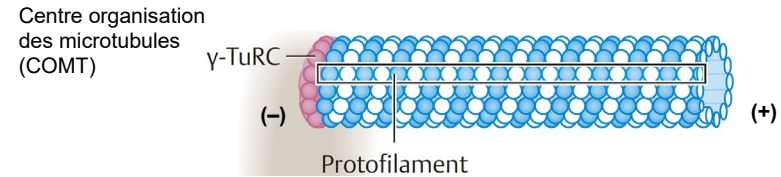


▲ FIGURE 54. **Protéines de pontage et organisation des microfilaments d'actine : une vision simplifiée.** D'après COOPER (2019), adapté / traduit.

β. Les protéines de coiffe : des protéines empêchant la dépolymérisation des extrémités de microtubules ou de microfilaments

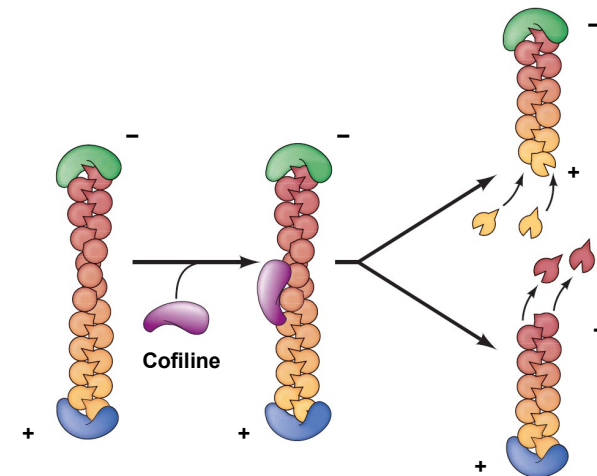


▲ FIGURE 55. **Coiffage et stabilisation des MF.** D'après COOPER (2019), adapté / traduit.



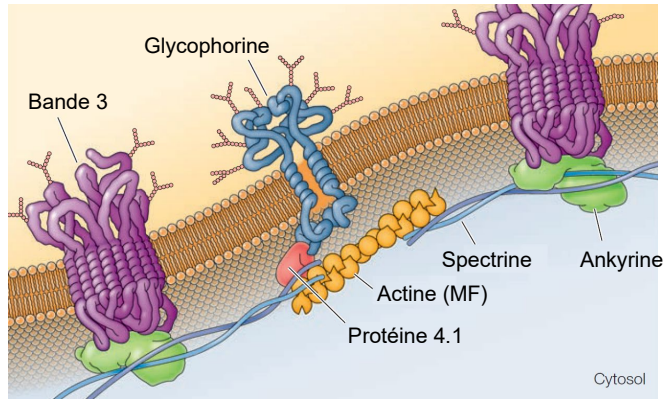
▲ FIGURE 56. **Complexe γ-TuRC à l'extrémité - (côté COMT) des MT.** D'après LÜLLMANN-RACUH & ASEN (2019), adapté.

γ. Les protéines de stabilisation ou de déstabilisation : des protéines contrôlant la stabilité des éléments de cytosquelette



▲ FIGURE 57. **Action de la cofiline : clivage des MF et genèse de nouvelles extrémités libres.** D'après COOPER (2019), adapté / traduit.

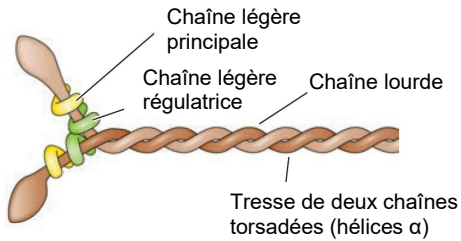
δ. Les protéines d'association aux membranes (protéines d'ancrage) et les protéines de liaisons aux jonctions cellulaires (protéines de liaisons)



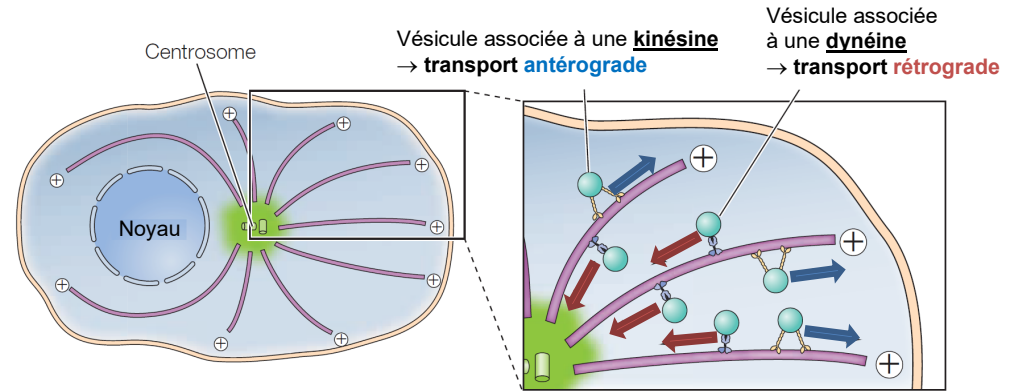
▲ FIGURE 58. Association microfilaments / plasmalemme dans les globules rouges mammaliens.
D'après COOPER (2019), adapté / traduit.

+ Revoir les **jonctions** dans le **chapitre 5**

ε. Les protéines motrices (= nanomoteurs = moteurs moléculaires) : des protéines qui se déplacent (de manière ATP-dépendante) sur le cytosquelette et assurent la motilité cellulaire



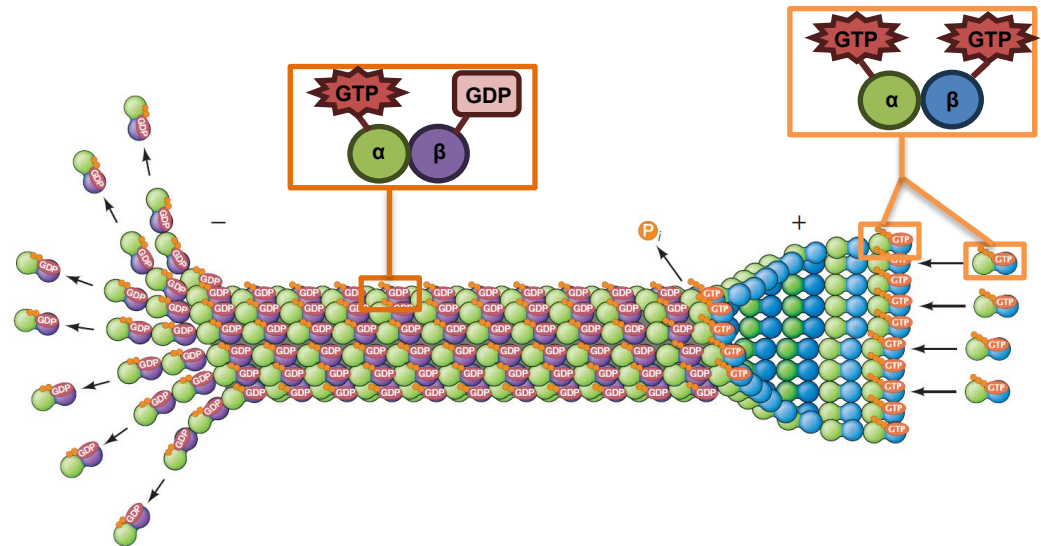
▲ FIGURE 59. Organisation d'une myosine II typique des sarcomères musculaires.
D'après COOPER (2019), adapté / traduit.



▲ FIGURE 60. Rôle des dynéines et kinésines dans le transport vésiculaire.
D'après COOPER (2019), adapté / traduit.

2. Des éléments qui s'assemblent selon des modalités précises et avec une dynamique particulière (in vivo ou in vitro)

a. Les microtubules : des éléments polymérisables et dépolymérisables (en lien avec la GTP / la GDP)



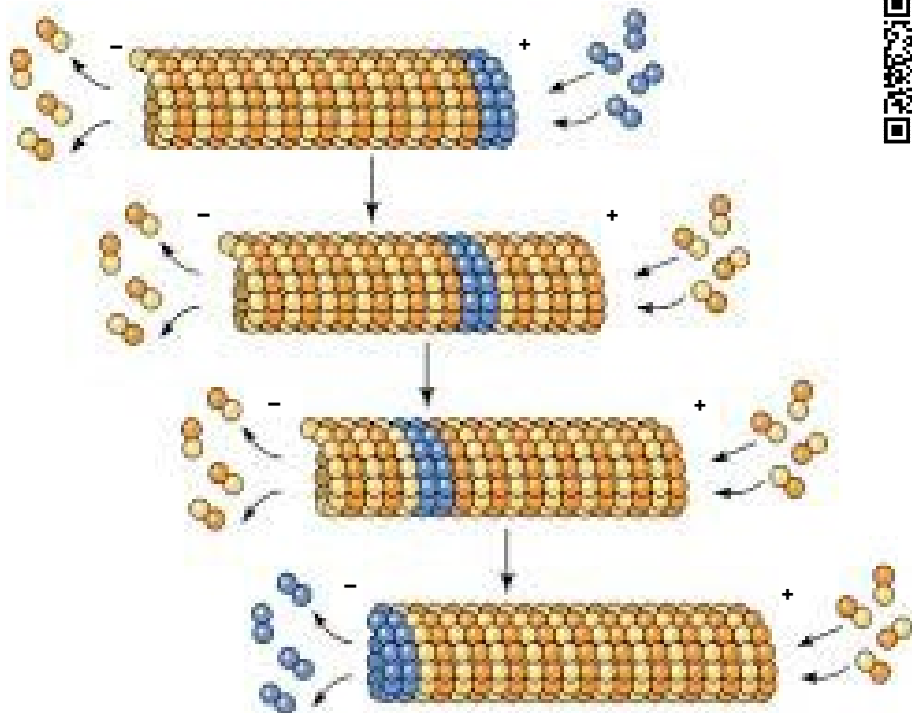
▲ FIGURE 61. Polymérisation et dépolymérisation des microtubules.
(!) Bien que **non représentée**, les **tubulines alpha** sont **toutes associées à une GTP**.
D'après COOPER (2019), adapté / traduit. ZOOMS ajoutés.



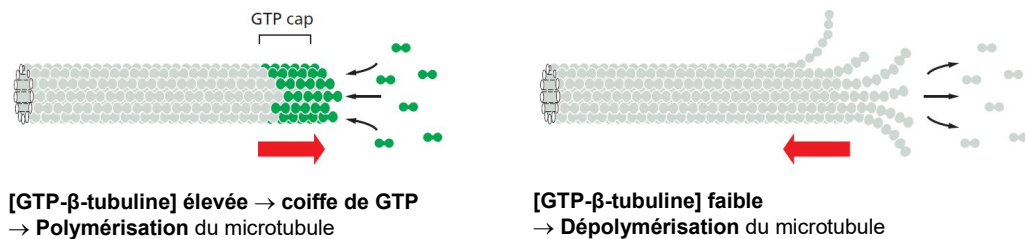
Une **super animation** (en anglais) en lien avec l'ouvrage de COOPER (2019) sur l'**organisation et la polymérisation des microtubules** :

<https://learninglink.oup.com/access/content/cooper8e-student-resources/cooper8e-chapter-14-animation-3>

[Bon, c'est un peu dommage que le **sens des tubulines** ait été **inversé** dans cette vidéo...]



▲ FIGURE 62. **Le treadmilling (tapis-roulant) des microtubules.**
Source à préciser.

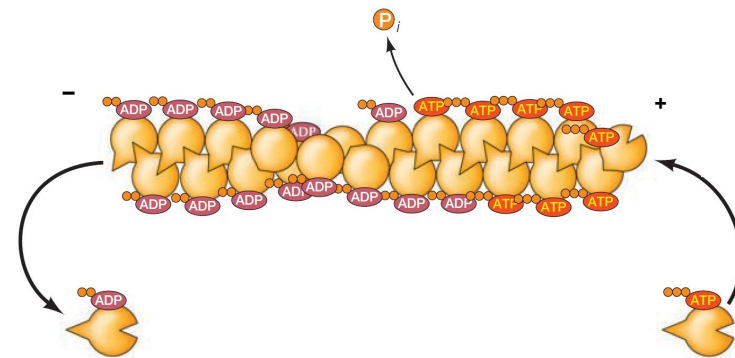


[GTP- β -tubuline] élevée → coiffe de GTP
→ Polymérisation du microtubule

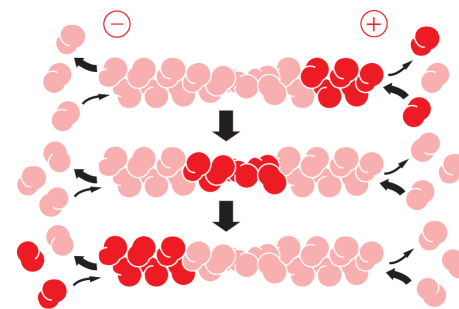
[GTP- β -tubuline] faible
→ Dépolymérisation du microtubule

▲ FIGURE 63. **L'instabilité dynamique des microtubules.**
D'après ALBERTS *et al.* (2015), adapté.

b. Les microfilaments d'actine : des éléments polymérisables et dépolymérisables (en lien avec l'ATP / l'ADP)



▲ FIGURE 64. **Polymérisation-dépolymérisation des actines G en microfilament.**
D'après COOPER (2019), adapté.

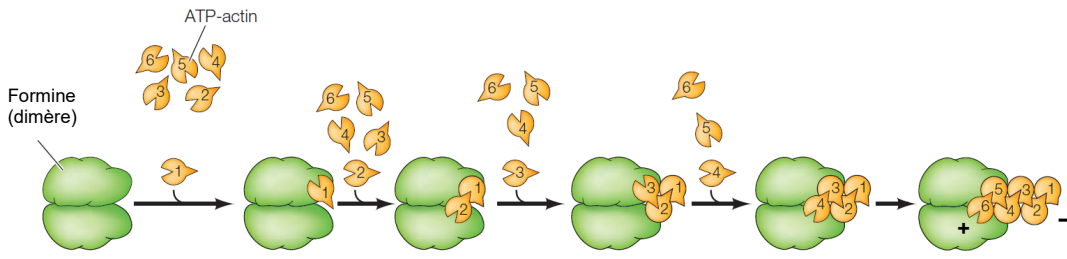


▲ FIGURE 65. **Le treadmilling (tapis-roulant) des microfilaments.**
D'après ALBERTS *et al.* (2015).

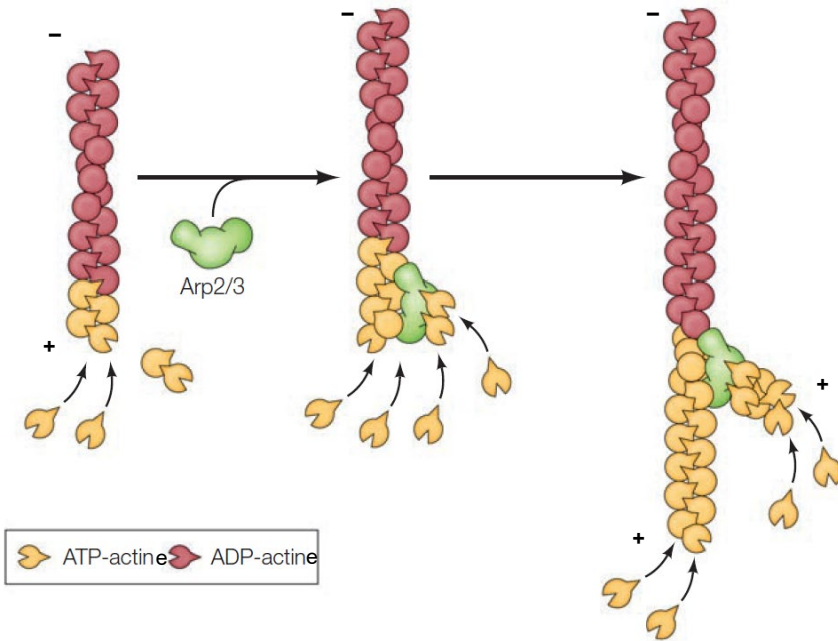
Une **super animation** (en anglais) en lien avec l'ouvrage de COOPER (2019) sur l'**organisation et la polymérisation des microfilaments** :

<https://learninglink.oup.com/access/content/cooper8e-student-resources/cooper8e-chapter-14-animation-1>





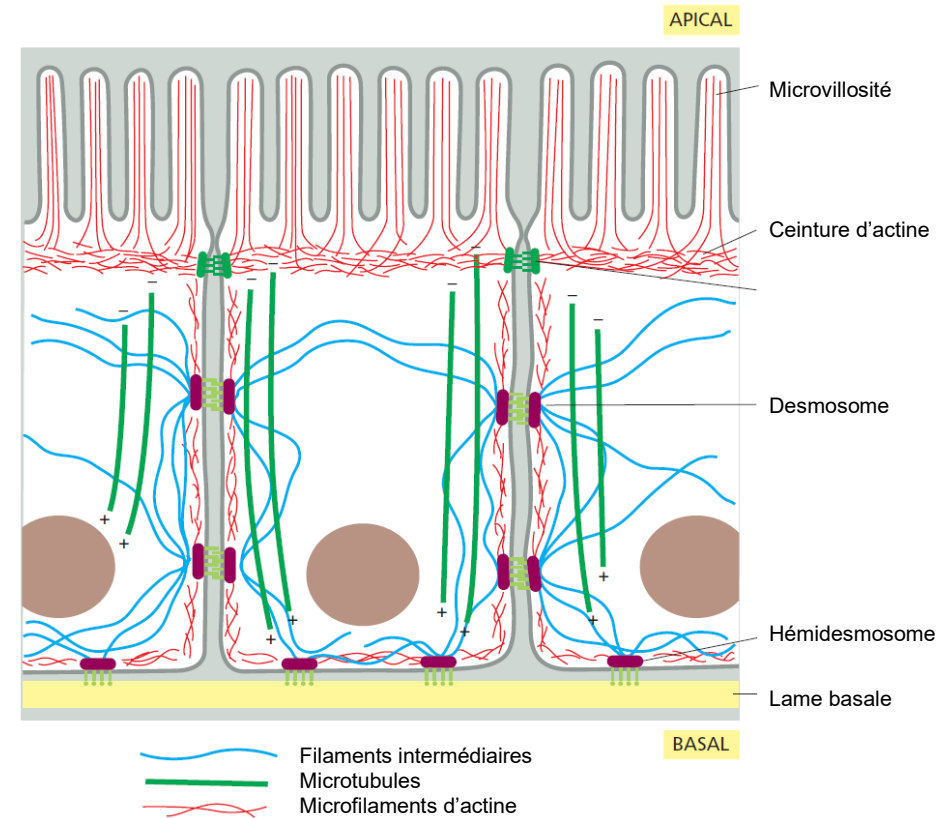
▲ FIGURE 66. Initiation et croissance des filaments d'actine.
D'après COOPER (2019), adapté.



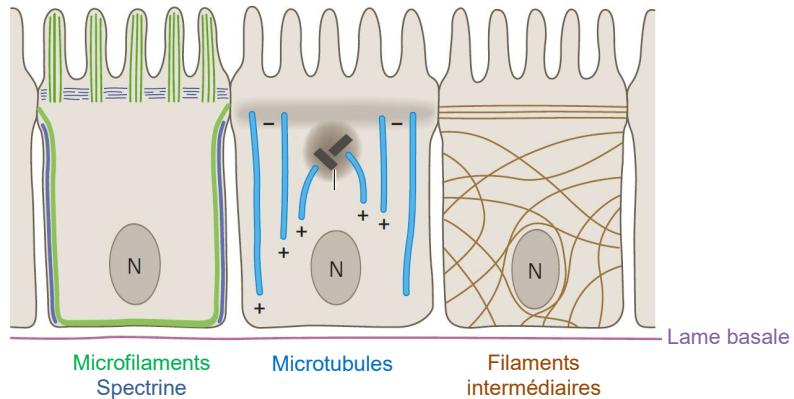
▲ FIGURE 67. Ramification des filaments d'actine.
D'après COOPER (2019), adapté.

c. Les filaments intermédiaires : des éléments autoassemblés mais dissociables par phosphorylation

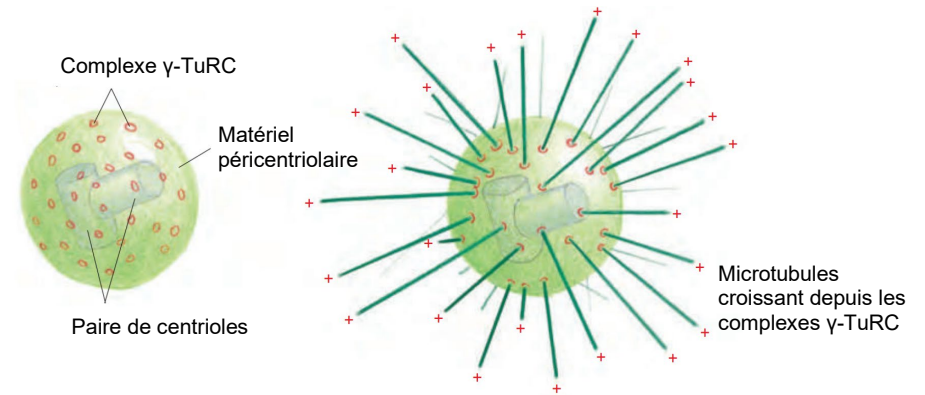
3. Des composés structurant et organisant la cellule



▲ FIGURE 68. Le cytosquelette dans une cellule épithéliale : l'entérocyte.
D'après ALBERTS et al. (2015), adapté / traduit.



▲ FIGURE 69. **Le cytosquelette dans une cellule épithéliale : l'entérocyte.**
D'après LÜLLMANN-RAUCH & ASAN (2019), adapté / traduit.

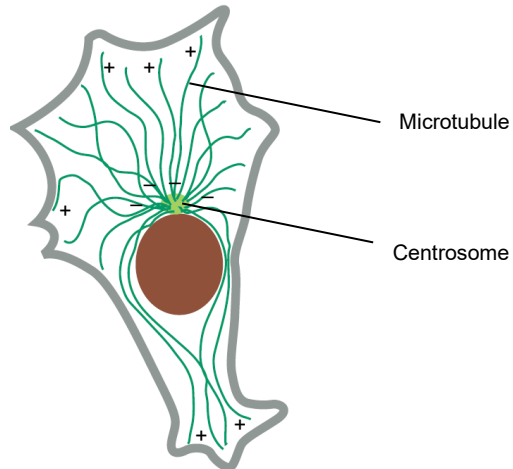


▲ FIGURE 71. **Le centrosome.** D'après ALBERTS et al. (2015), adapté / traduit.

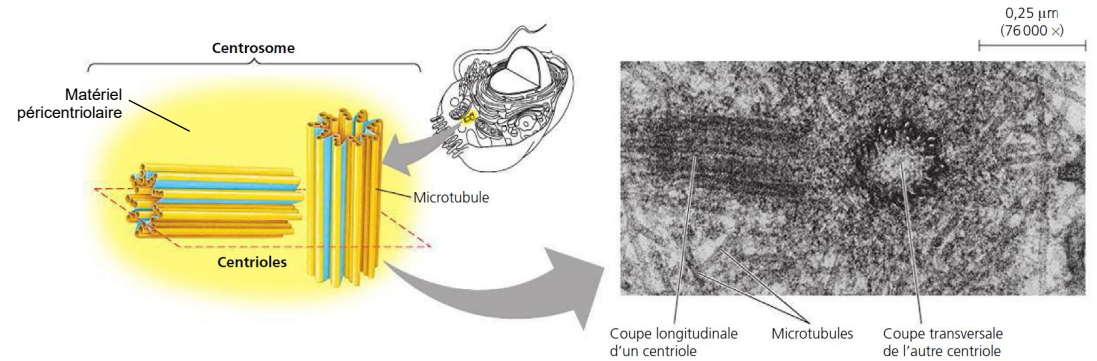
a. Cas des microtubules

a. Dans les cellules animales

i. Dans la plupart des cellules : une armature en étoile rayonnant à partir du centrosome



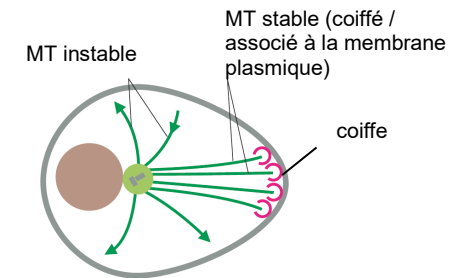
▲ FIGURE 70. **Localisation des microtubules dans un fibroblaste.**
D'après ALBERTS et al. (2015), adapté / traduit.



Le centrosome et sa paire de centrioles. La plupart des cellules animales possèdent un centrosome, une zone près du noyau où se forment les microtubules. Ce centrosome contient une paire de centrioles, chacun d'un diamètre d'environ 250 nm (0,25 μm), disposés à angle droit l'un par rapport à l'autre et se composant chacun de neuf triplets de microtubules. Les parties bleues du schéma représentent les protéines autres que la tubuline qui relient les triplets (MET).

▲ FIGURE 72. **Le centrosome des cellules animales.** D'après CAMPBELL et al. (2012).

- Les **extrémités +** sont associées à des **complexes protéiques** (dont des protéines de **coiffe**) qui les ancrent aux **protéines membranaires** et au **réseau d'actine**. **Sans cela**, les **MT** sont **instables** et potentiellement **dépolymérisables** (figure 73).

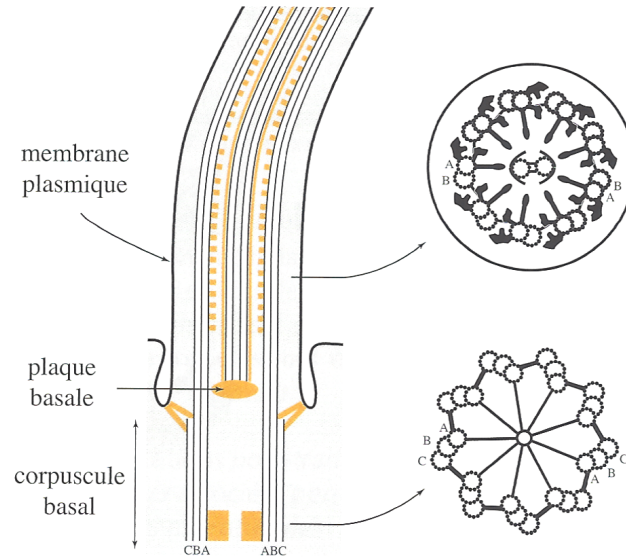


▲ FIGURE 73. **Stabilisation membranaire des microtubules.**
D'après ALBERTS et al. (2014), adapté / traduit.

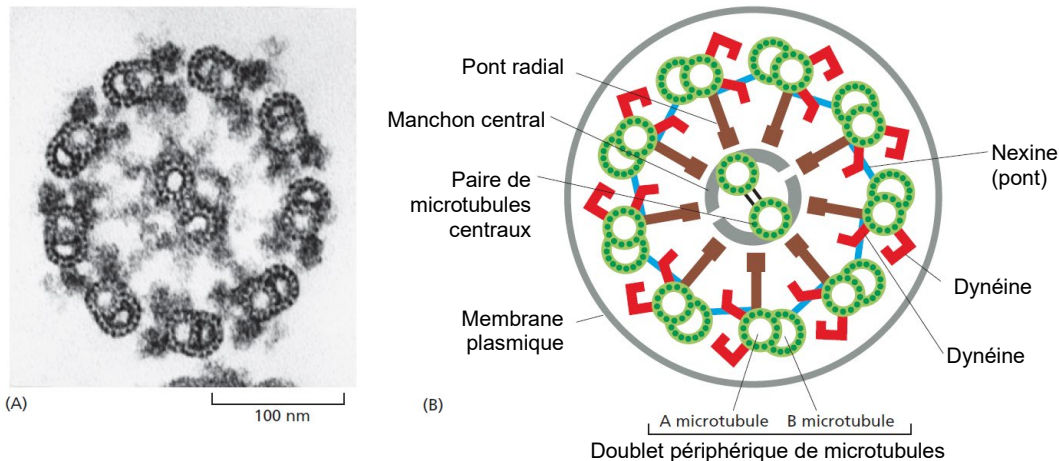
ii. Dans la plupart des cellules épithéliales : une armature dont les unités présentent une disposition essentiellement parallèle

iii. Dans les expansions cytoplasmiques motiles pourvues d'un axonème ou undulipodia (cils, flagelles)

Le flagelle bactérien (vu plus haut) n'a rien à voir en termes d'organisation avec le flagelle eucaryote.

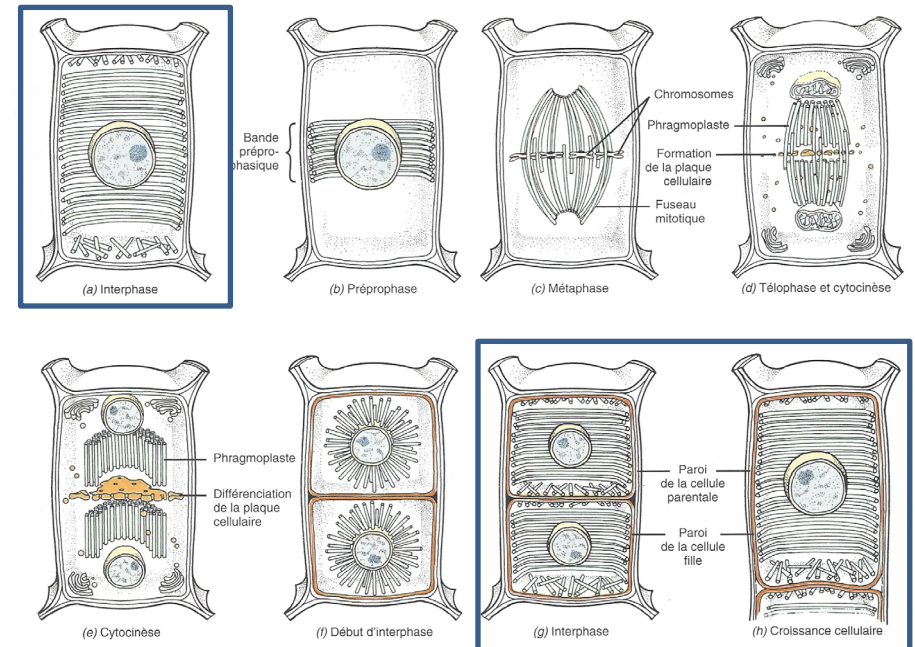


▲ FIGURE 74. La base de l'axonème. D'après BASSAGLIA (2013).



▲ FIGURE 75. L'axonème. D'après ALBERTS et al. (2015), adapté / traduit.

β. Dans les cellules végétales : un positionnement circulaire périphérique en interphase (et une disposition variable en division)



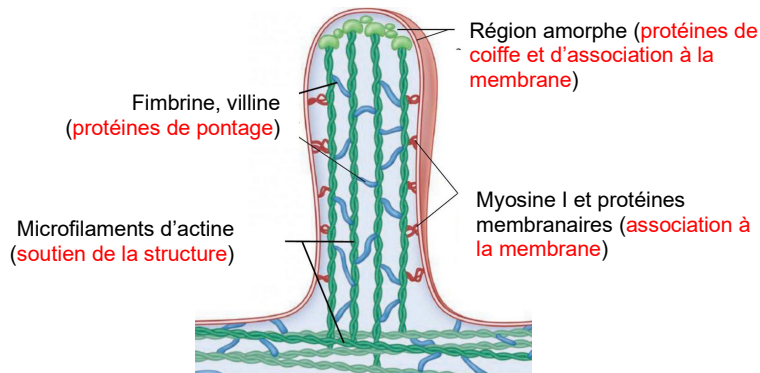
Répartition des microtubules et cycle cellulaire Modifications de la répartition des microtubules au cours du cycle cellulaire et formation de la paroi cellulaire pendant la cytokinèse. (a) Pendant l'interphase, et dans les cellules qui s'agrandissent et se différencient, les microtubules se trouvent juste à l'intérieur de la membrane plasmique. (b) Immédiatement avant la prophase, une bande annulaire de microtubules, la bande préprophasique, entoure le noyau dans un plan qui correspond au plan équatorial du futur fuseau mitotique et les microtubules du fuseau prophasique commencent à s'assembler de part et d'autre du noyau. (c) Pendant la métaphase, les microtubules forment le fuseau mitotique. (d) Pendant la télaphase, les microtubules sont organisés en un phragmoplaste situé entre les deux noyaux fils. La

plaque cellulaire, produite par la fusion de vésicules de Golgi dirigées par les microtubules du phragmoplaste, se forme à l'équateur du phragmoplaste. (e) Tandis que la plaque cellulaire se développe au centre du phragmoplaste, le phragmoplaste et la plaque cellulaire s'accroissent vers l'extérieur jusqu'à atteindre la paroi de la cellule en division. (f) Au début de l'interphase, des microtubules rayonnent dans le cytoplasme à partir de l'enveloppe nucléaire. (g) Chaque cellule fille forme sa propre paroi primaire. (h) La paroi de la cellule mère se déchire, tandis que les cellules filles grandissent (celle du haut est seule représentée ici). En (g) et (h), les microtubules se trouvent à nouveau juste à l'intérieur de la membrane plasmique, où ils interviennent dans l'orientation des nouvelles microfibrilles de cellulose en formation.

▲ FIGURE 76. Évolution de la répartition des microtubules au cours du cycle cellulaire. D'après RAVEN et al. (2007).

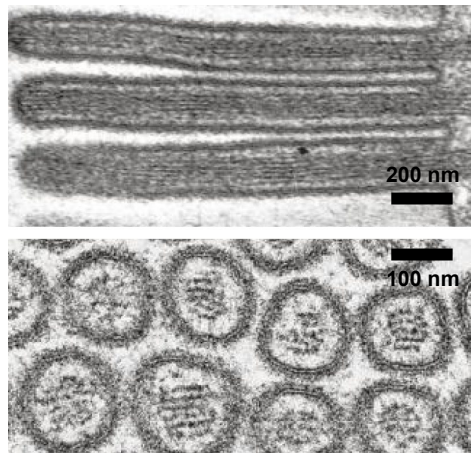
b. Cas des microfilaments d'actine

α. Dans les cellules animales épithéliales : un réseau plutôt périphérique participant au maintien de la forme cellulaire et structurant les microvillosités



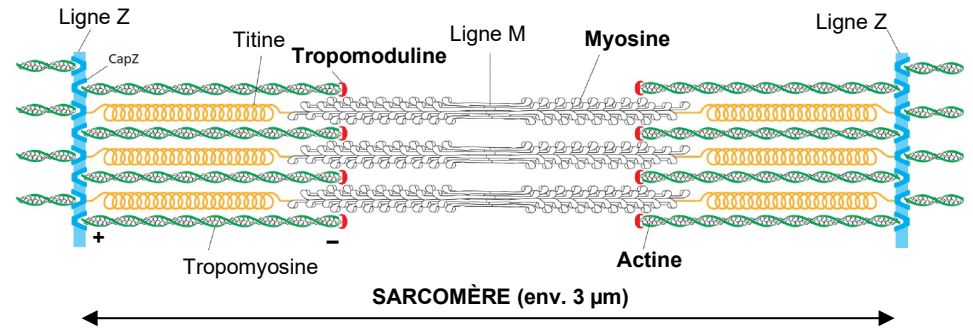
▲ FIGURE 77. **Organisation d'une microvillosité.**

<https://forums.futura-sciences.com/biologie/809377-proteines-liees-aux-microfilaments-d-actine-microvillosites.html> (consultation janvier 2022).

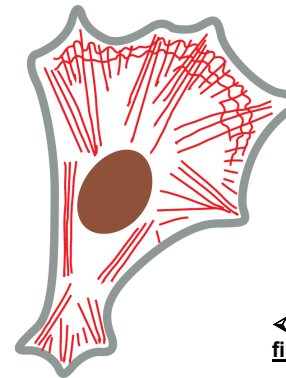


▲ FIGURE 78. **Microvillosités au MET en coupes longitudinale et transversale.** D'après LÜLLMANN-RAUCH & ASAN (2019).

β. Dans d'autres types de cellules : une organisation et une dynamique en lien avec la fonction



▲ FIGURE 79. **Organisation d'un sarcomère.** D'après ALBERTS *et al.* (2015), adapté / traduit.



◀ FIGURE 80. **Répartition des microfilaments dans un fibroblaste.** D'après ALBERTS *et al.* (2015).

γ. Dans les cellules végétales : un réseau qui organise en partie l'intérieur de la cellule (si l'on excepte le rôle de la vacuole turgescente)

c. Cas des filaments intermédiaires : dans le noyau de toutes les cellules eucaryotes (lamines nucléaires) et dans le cytosol des cellules animales

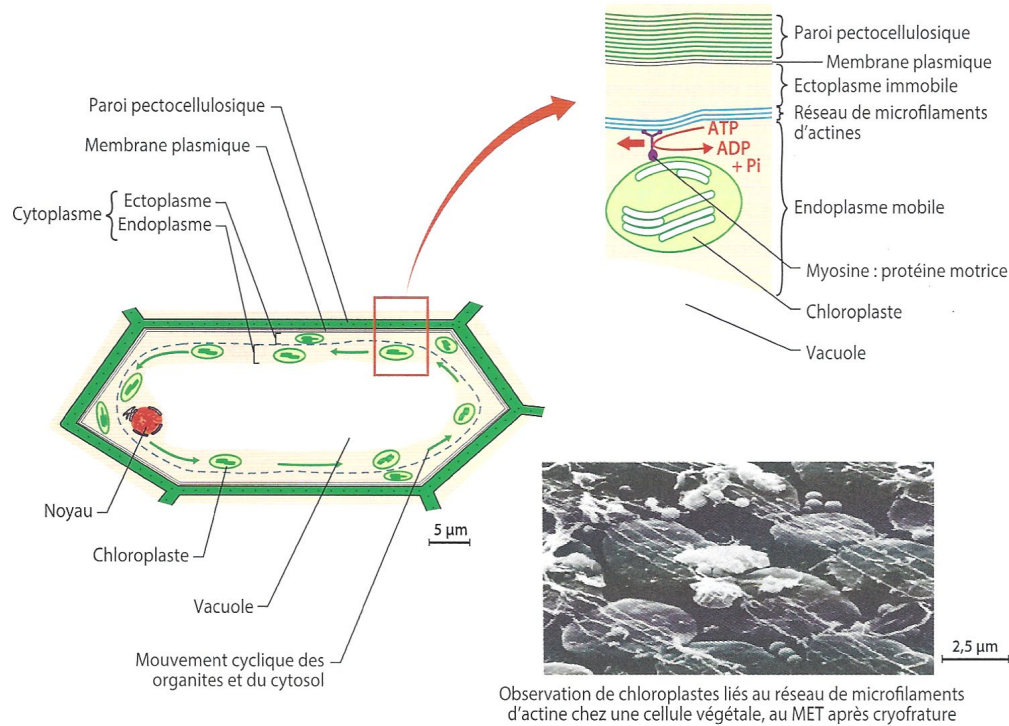
4. Des composés impliqués dans le fonctionnement et le dynamisme cellulaires

a. Le trafic vésiculaire et le déplacement d'organites

α. Un déplacement sur le réseau de microtubules (dynéines, kinésines), notamment dans les cellules animales

β. La possibilité d'utiliser le réseau d'actine, particulièrement dans les cellules végétales (myosines) : l'exemple de la cyclose

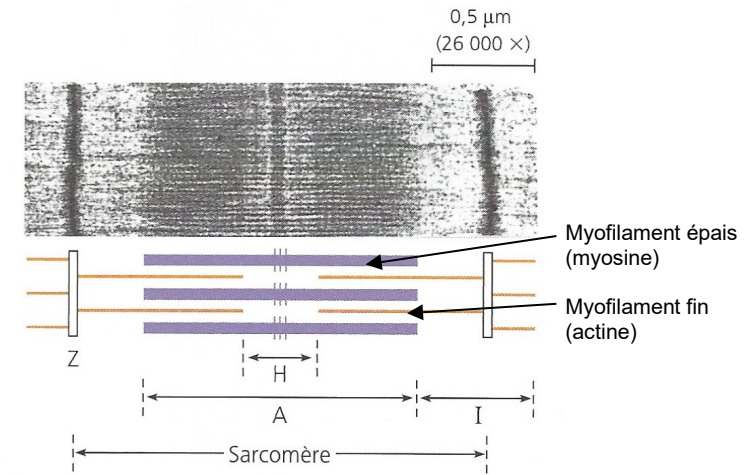
Le cytoplasme des cellules végétales est parcouru par un réseau de microfilaments d'actine parallèles, sur lequel sont fixées des myosines. Celles-ci sont liées aux organites, et se déplacent le long du réseau en hydrolysant de l'ATP, entraînant les organites et le cytosol. Deux régions du cytoplasme se distinguent : la portion la plus périphérique, l'ectoplasme, a la consistance d'un gel et les organites y sont peu mobiles, à l'inverse de l'endoplasme accolé à la vacuole, qui lui est plus fluide.



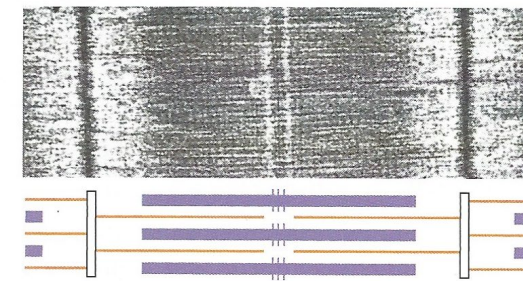
▲ FIGURE 81. **La cyclose.** D'après DAUTEL *et al.* (2021).

b. Les processus de motilité cellulaire, déformation et migration

a. La contraction musculaire permise par le couple actine-myosine

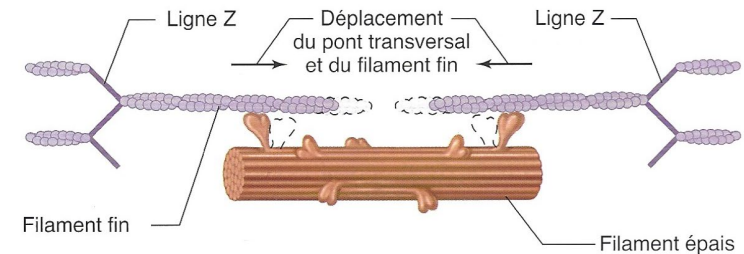


(a) Muscle détendu (en extension)



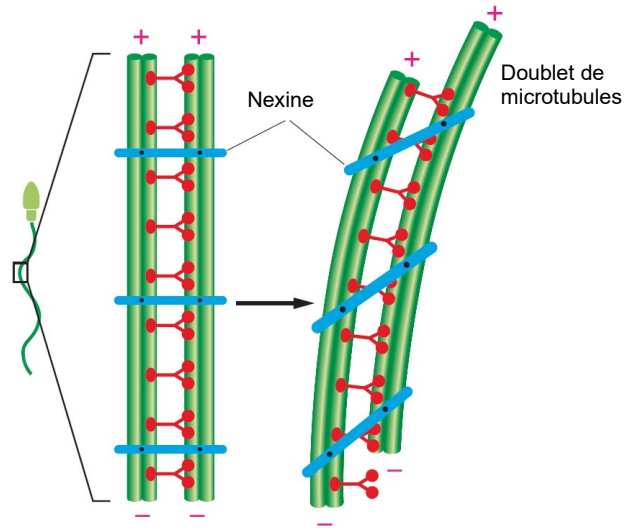
(b) Muscle en cours de contraction

▲ FIGURE 82. **Électronographies d'un muscle à divers niveaux de contraction et leur interprétation.** D'après CAMPBELL & REECE (2004).



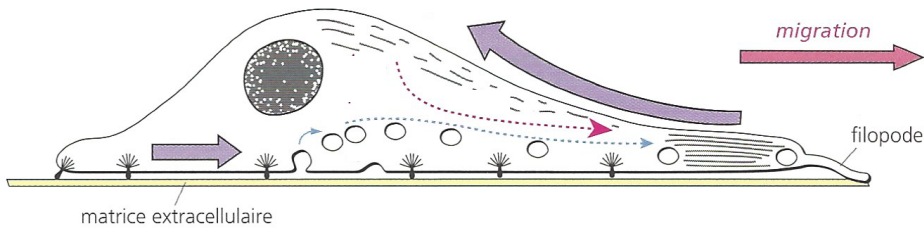
▲ FIGURE 83. **Glissement des têtes de myosine sur les filaments fins, provoquant le raccourcissement des sarcomères.** D'après VANDER *et al.* (2013).

β. Le déplacement des cils et flagelles permis par le couple microtubules-dynéine au sein de l'axonème



▲ **FIGURE 84. Modèle de fonctionnement de l'axonème.** D'après ALBERTS *et al.* (2014).

γ. La déformation et la migration de cellules animales permises par une réorganisation des éléments de cytosquelette et des jonctions transitoires avec la matrice extracellulaire

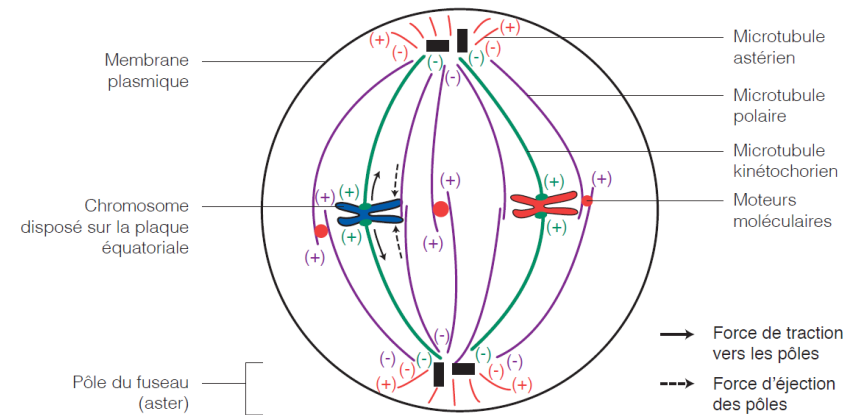


▲ **FIGURE 85. Une cellule du mésoderme en migration lors du développement.** D'après DARRIBÈRE (2002).

c. Les processus dynamiques associés aux divisions cellulaires

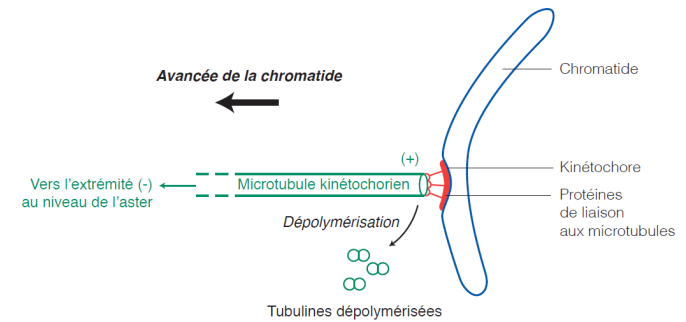
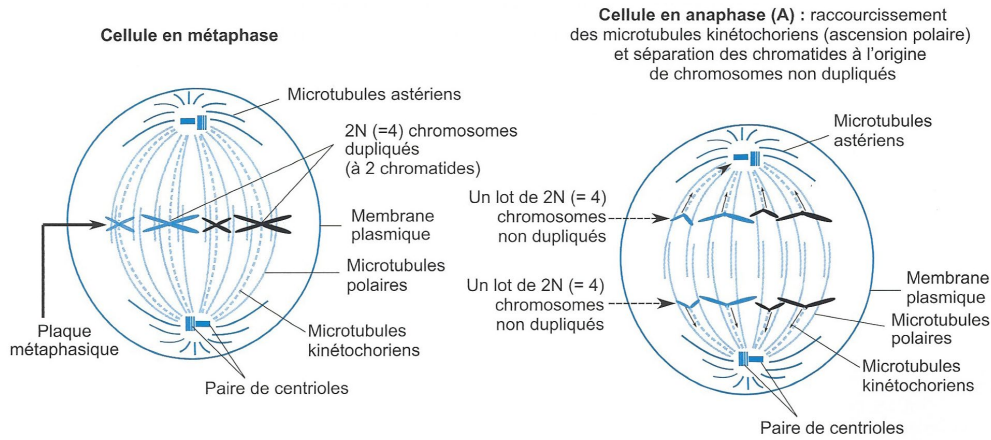
Voir le chapitre consacré au cycle cellulaire

α. La migration des chromosomes au cours de la division : un couplage entre la polymérisation-dépolymérisation des microtubules du fuseau de division et des protéines motrices



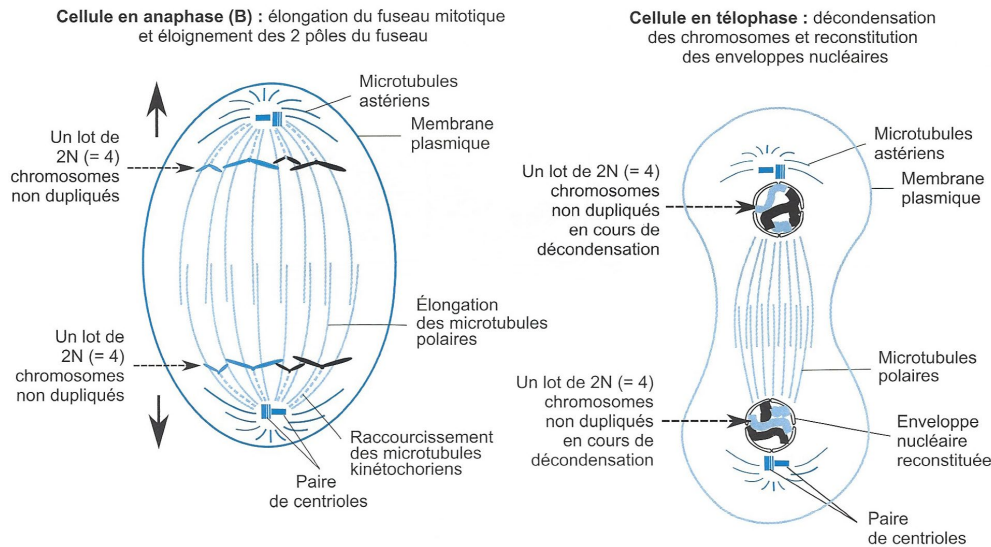
Seulement deux chromosomes ont été représentés pour la lisibilité. (+) et (-) font référence aux extrémités des microtubules. Les flèches représentent la direction des forces exercées sur chaque chromatide à la métaphase. Flèche pleine : force de traction vers le pôle exercé au niveau du kinétochore ; flèche en tirets : force d'éjection du pôle exercé au niveau des bras des chromatides. Ces forces sont liées aux interactions entre microtubules et des moteurs moléculaires.

▲ **FIGURE 86. Organisation et fonctionnement du fuseau mitotique.** D'après SEGARRA *et al.* (2014).



Le modèle présenté sur la figure est une représentation simplifiée du mécanisme de traction de la chromatide par dépolymérisation des microtubules kinétochoriens.

▲ **FIGURE 88. Mécanisme de l'ascension polaire des chromatides.** D'après SEGARRA *et al.* (2014).

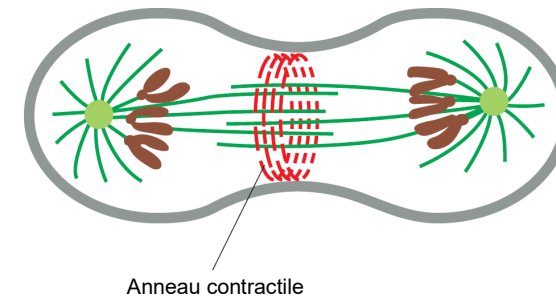


▲ **FIGURE 87. Évolution du fuseau achromatique lors des principales étapes de la division mitotique.** D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

Pour information

- On notera sur la **figure 87** que certains auteurs distinguent **deux parties dans l'anaphase** :
- L'**anaphase A** où **la cellule garde la même taille** ; on y assiste au **clivage des centromères** et eu début de l'**ascension polaire des chromosomes séparés**.
 - L'**anaphase B** où **la cellule s'allonge grâce aux microtubules polaires** ; on y assiste à la **fin de l'ascension polaire**.

β. La constriction entre cellules filles lors de la cytodiérèse animales : un couplage actine-myosine

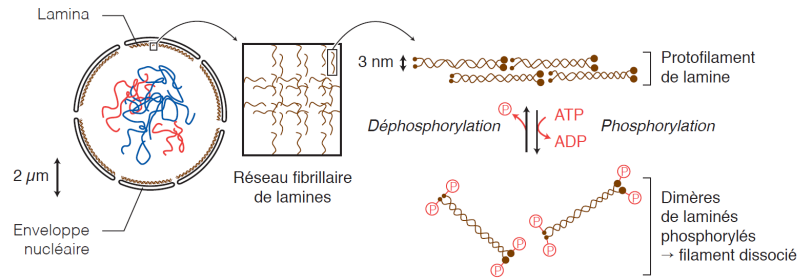


▲ **FIGURE 89. Cytodiérèse animale : origine du sillon de division.** D'après ALBERTS *et al.* (2015).

γ. La séparation des cellules filles lors de la cytodiérèse végétale : un couplage microtubules / protéines motrices

Revoir le chapitre 5

δ. La vésicularisation du noyau et sa reformation : la phosphorylation-déphosphorylation des lamines nucléaires

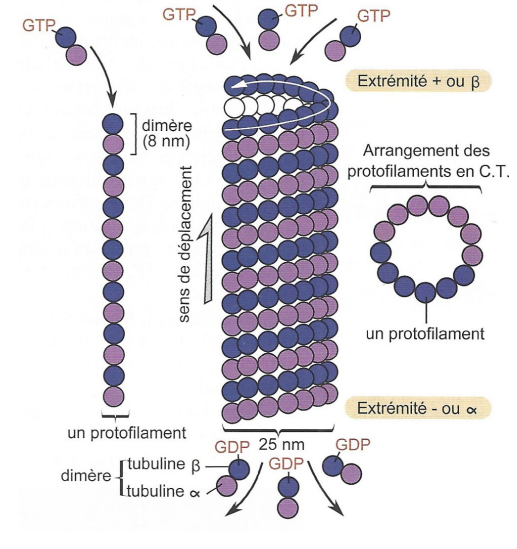
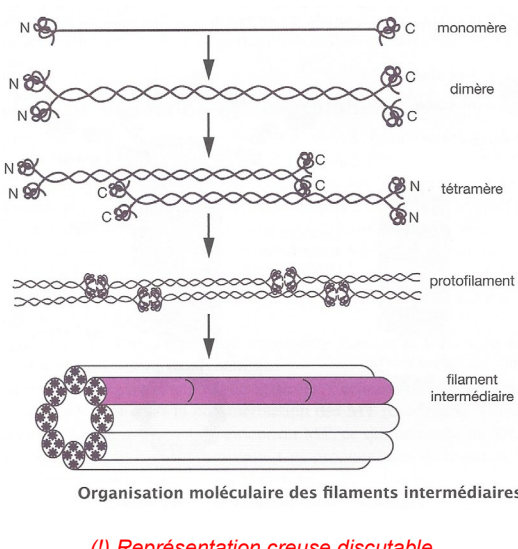
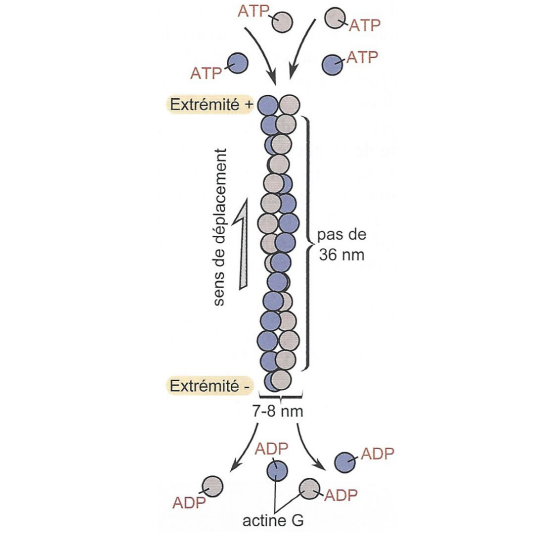


Les polypeptides de lamines forment des dimères qui constituent les unités d'association des filaments de lamines (association en « tête à queue »). La phosphorylation des lamines sur leurs extrémités N et C terminales provoque la dissociation des dimères.

▲ **FIGURE 90. Rôle des lamines sur l'état de l'enveloppe nucléaire.**
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

▼ **TABLEAU III. Le cytosquelette eucaryote : une vue d'ensemble.** Original 2021.

Caractère	Microtubules (MT)	Filaments intermédiaires (FI)	Microfilaments (MF = μF)
Constitution et organisation	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre 25 nm - Tube cylindrique creux - 13 rangées de protofilaments - Monomère protéique globulaire polymérisé : tubulines α et β dimérisées - Polarité : extrémité (+) et extrémité (-) 	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre 8-12 nm [moy. 10 nm] - Filaments pleins ou creux [pas très clair] (<i>on trouve les deux types de représentations...</i>) - Association de monomères fibrillaires en tétramères, mis bout-à-bout en protofilaments >> 8 protofilaments composent un FI <p>(!) Diversité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>toutes cellules eucaryotes</u> <ul style="list-style-type: none"> ° Lamines nucléaire (ensemble : lamina nucléaire) → sous la membrane interne du noyau - <u>cellules animales uniquement</u> <ul style="list-style-type: none"> ° Kératines (= cytokeratines) → cellules épithéliales ° Neurofilaments → cellules nerveuses ° Vimentine → fibroblastes, leucocytes, cellules embryonnaires [= cellules déformables / motiles] + cellules endothéliales ° Desmine → architecture / positionnement des organites dans les cellules musculaires <p>... et beaucoup d'autres...</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre 7 nm - Filaments pleins - 2 chaînes torsadées (actine F = filamenteuse) - Monomère protéique globulaire polymérisé : actine G (actine globulaire) - Polarité : extrémité (+) [barbelée] et extrémité (-) [pointue]

<p>Schéma d'organisation (et d'assemblage-désassemblage <i>in vitro</i>)</p>	 <p>D'après PEYCRU <i>et al.</i> (2013)</p>	 <p>(!) <i>Représentation creuse discutable.</i></p>	 <p>D'après PEYCRU <i>et al.</i> (2013)</p>
<p>Modalités d'assemblage et de désassemblage</p>	<p>- Assemblage : polymérisation de dimères de tubulines $\alpha\text{-}\beta$ avec GTP-β-tubuline, plutôt au pôle + - Désassemblage : dépolymérisation des dimères avec GDP-β-tubuline / désassociation des protofilaments <u>si extrémité non capée</u></p> <p><i>In vitro / in vivo</i> : instabilité dynamique, treadmilling</p>	<p>- Assemblage : autoassemblage des constituants - Désassemblage : par phosphorylation et/ou en lien avec l'état des autres éléments du cytosquelette</p>	<p>- Assemblage : polymérisation d'ATP-actine G, plutôt au pôle + - Désassemblage : dépolymérisation des ADP-actines G / désassociation des protofilaments <u>si extrémité non capée</u></p> <p><i>In vitro / in vivo</i> : instabilité dynamique, treadmilling</p>
<p>Localisation cellulaire</p>	<p>- <u>cellules animales</u> : en étoile, pôle – stabilisé par γ-TuRC au niveau du centrosome - <u>sauf cellules épithéliales</u> : MT parallèles - <u>cellules végétales</u> : variation lors du cycle cellulaire, en interphase position périphérique guidant la mise en place des celluloses</p>	<p>- <u>toutes cellules eucaryotes</u> : dans le noyau (lamina) - <u>cellules animales</u> : réseau non orienté dans le cytosol - <u>cellules végétales</u> : absents du cytosol</p>	<p>- <u>cellules animales</u> : partout, plus dense en périphérie / sauf types cellulaires particuliers (cellules musculaires, fibroblastes...); présence dans les microvillosités - <u>cellules végétales</u> : partout</p>
<p>Fonctions dynamiques</p>	<p>- Flux vésiculaire / déplacement d'organites - Axonème : motilité - Fuseau mitotique : déplacement de chromosomes, modification de forme de la cellule - Phragmoplaste : cytotéiérèse végétale - Guidage de la synthèse de cellulose chez les végétaux</p>	<p>- Lamina : vésicularisation / reformation du noyau lors de la mitose - Vimentine : fort dynamisme dans les cellules déformables</p>	<p>- Flux vésiculaire / déplacement d'organites (ex. cyclose végétale) - Anneau contractile : cytotéiérèse animale - Sarcomères : contraction musculaire - Lamellipodes, filipodes, pseudopodes : migration cellulaire</p>

B. Le cytosquelette bactérien : l'identification de protéines homologues aux protéines cytosquelettiques eucaryotes

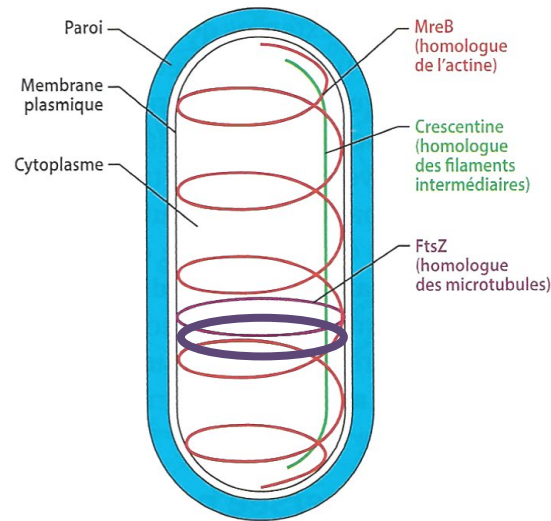
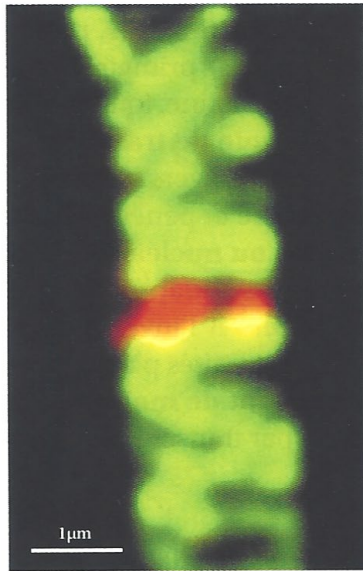
Attention, cela ne veut pas dire qu'elles ont la même fonction.

1. La protéine FtsZ, protéine homologue de la tubuline

2. Les protéines FtsA, MreB et ParM, protéines homologues de l'actine

3. La crescentine, protéine homologue des filaments intermédiaires

Observation au microscope à fluorescence avec marquage de MreB en vert et FtsZ en rouge



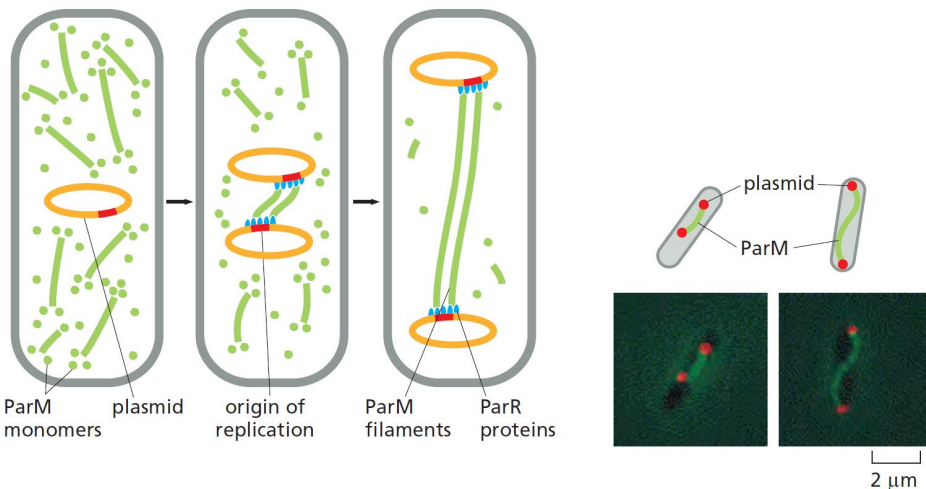
▲ FIGURE 91. Des protéines homologues des protéines cytosquelettiques eucaryotes chez les Bactéries. D'après DAUTEL *et al.* (2021).

4. Des protéines cytosquelettiques propres sans homologie avec le cytosquelette eucaryote

- On connaît également des protéines à « fonction cytosquelettique » sans homologie connu avec des protéines eucaryotes (ex. **MindD** et **ParA**, protéines impliquées dans la partition de plasmides).

Plus d'informations sur le cytosquelette bactérien (Cell Snapshot 2016) :

[https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674\(16\)30865-0.pdf](https://www.cell.com/cell/pdf/S0092-8674(16)30865-0.pdf)



▲ FIGURE 92. ParM, protéine dont la polymérisation sépare des molécules d'ADN récemment dupliquées. D'après ALBERTS *et al.* (2015).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **cellules** possèdent un **squelette interne dynamique** : le **cytosquelette**.
- ✓ Chez les **cellules eucaryotes**, il est constitué de **trois catégories de structures protéiques fibrillaires** : les **microfilaments d'actine**, les **microtubules de tubuline** et les **filaments intermédiaires**.
- ✓ Le **cytosquelette des bactéries** présente des **protéines homologues** à celui des **cellules eucaryotes**.

III. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux de matière, d'énergie et d'information

- Les **cellules** sont des **systèmes thermodynamiques ouverts**, c'est-à-dire des **systèmes physico-chimiques échangeant de la matière et de l'énergie avec leur environnement** ; les **compartiments** en leur sein le sont aussi.
- Les **cellules** et les **compartiments** sont ainsi traversés par des **flux** :
 - de **matière** : **atomes, ions, molécules**.
 - d'**énergie** : **capacité à effectuer un travail, c'est-à-dire à modifier un système physico-chimique** (et la cellule réalise bien des **travaux** : chimiques, osmotiques, mécaniques...).
 - et d'**information** : **signaux et données permettant la communication entre structures biologiques, leur édification et le contrôle de leur fonctionnement**.

Capacités exigibles

- ✓ **Argumenter** l'existence de trois types de flux à l'aide des exemples de l'entérocyte, de la cellule du parenchyme palissadique et d'*E. coli*.
- ✓ **Illustrer** la coopération fonctionnelle entre les compartiments.

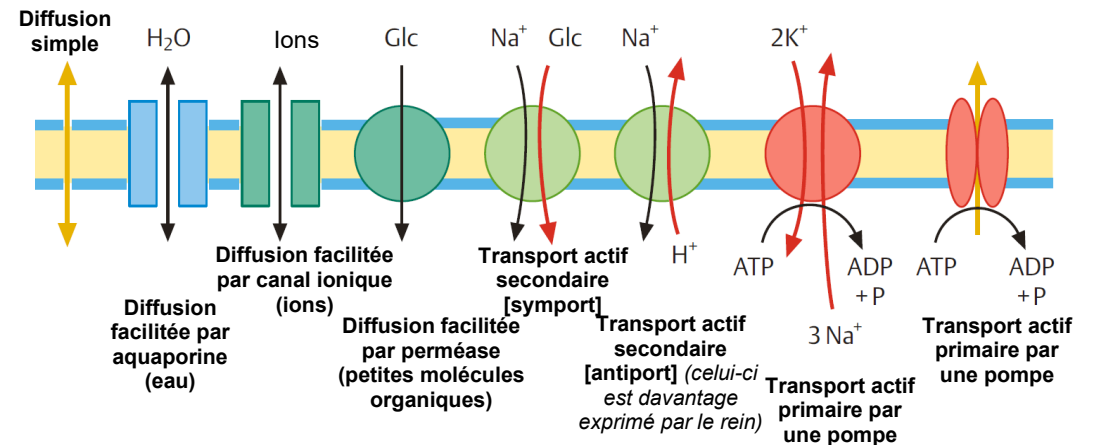
A. Des cellules eucaryotes traversées par des flux impliquant des échanges avec l'extérieur et une coopération entre compartiments

1. Spécialisation et coopération des compartiments entre eux et avec le milieu extracellulaire

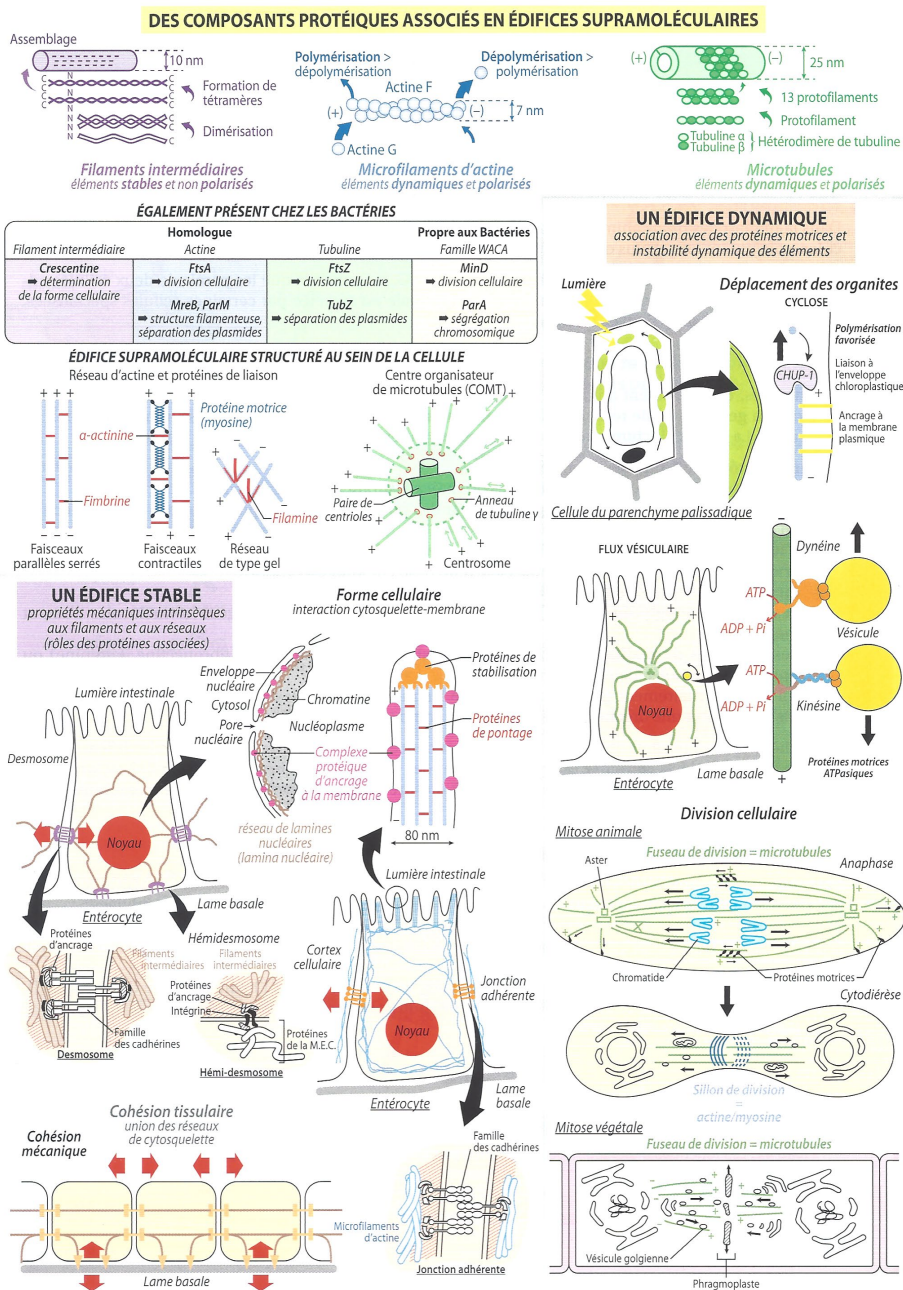
a. Une complémentarité nécessaire

b. Les modalités des flux entre compartiments ou avec l'extérieur de la cellule : transferts transmembranaires, translocation, trafic vésiculaire

Voir le **chapitre sur les membranes** qui explicite les **mécanismes de tous ces processus**.



▲ **FIGURE 94. Principaux transports transmembranaires au niveau de la membrane plasmique de l'entérocyte.** D'après LÜLLMANN-RAUCH & ASEN (2019), adapté.



▲ **FIGURE 93. Une vue d'ensemble sur le cytosquelette.** D'après SAINTPIERRE, BORDI *et al.* (2021).

2. Mise en évidence d'un flux sécrétoire (= cycle sécrétoire) dans les cellules acineuses pancréatiques : les expériences historiques de PALADE (années 1960)

a. Principe des expériences

Revoir la fiche technique du TP SV C « Principales techniques d'observation et d'étude des cellules »

a. Principe du *pulse-chase* : le suivi d'un élément radioactif dans le temps et l'espace

Principe général d'un *pulse-chase*

On soumet brièvement un support biologique à des éléments radioactifs (*pulse*) puis on suit le déplacement et le devenir de ces éléments au cours du temps (*chase*).

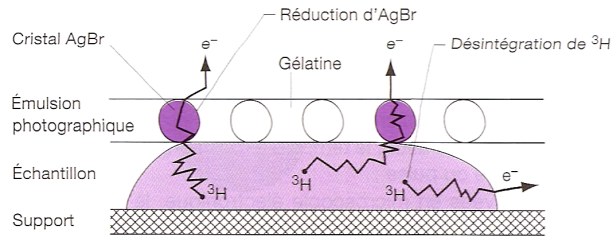


G. E. PALADE

β. Obtention de résultats : autoradiographie, comptage de grains d'argent, ultracentrifugation avec dosage de radioactivité

Principe de l'autoradiographie

Ce sont des électronographies traitées de manière particulière, avec une émulsion photographique sensible à la radioactivité au-dessus de la préparation. Le rayonnement produit par les éléments radioactifs imprime le film photographique (figure 95).



Principe de l'autoradiographie

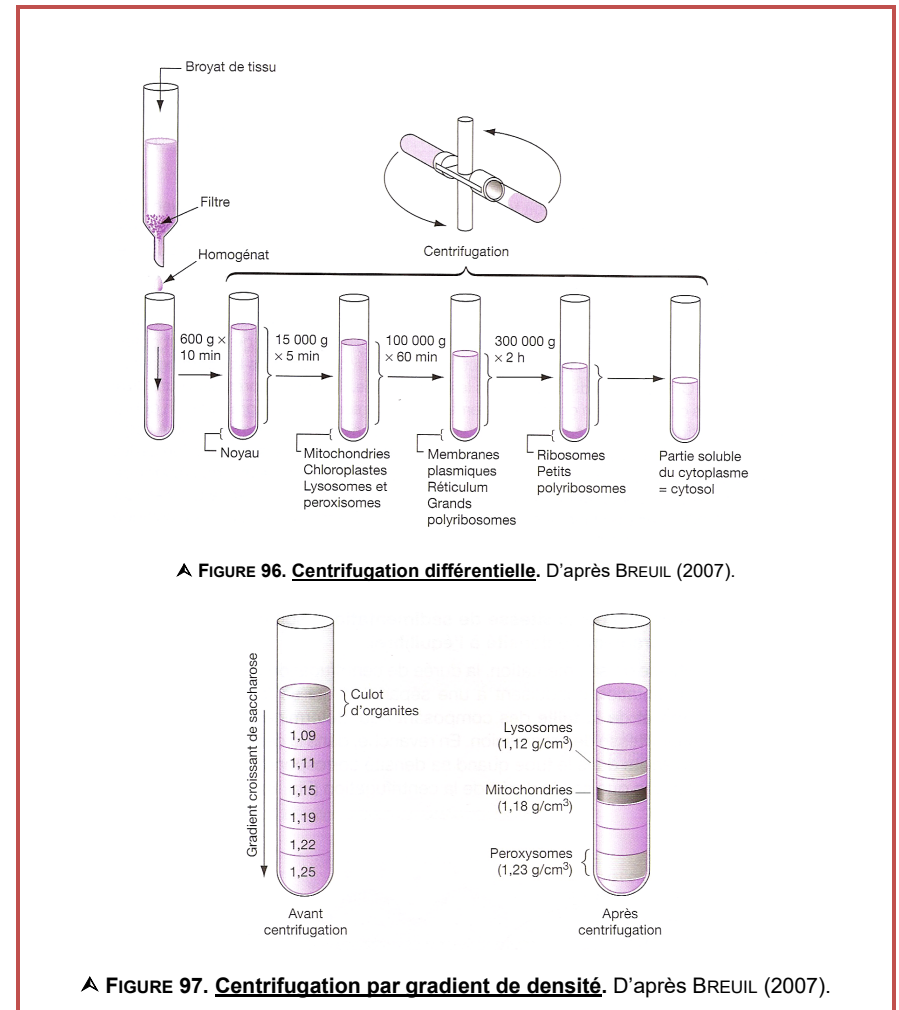
Les particules β (e^-) émises par la désintégration d'un radio isotope n'ont pas toutes la même énergie. Celles produites par le ^{32}P impressionnent un film argentique sur 1 cm alors que celles émises par 3H ne parcourent que 0,5 μm . ce qui permet de localiser la molécule radioactive dans un cercle de ce rayon. Au ME, le cheminement de la particule apparaît sous la forme d'un tortillon.

▲ FIGURE 95. Autoradiographie. D'après BREUIL (2007).

Principe de l'ultracentrifugation

L'étude des constituants cellulaires nécessite :

- Le **broyage cellulaire**, réalisé **mécaniquement** ou par **sonication** (utilisation d'ultrasons) ;
- L'**ultracentrifugation** (**centrifugation à très haute vitesse**, plus de 15000 tours/min) du mélange ;
- La **sédimentation** des éléments recherchés ; la **vitesse de sédimentation** s'exprime en Svedberg (S) ($1 S = 10^{-13} s$). On peut **soit appliquer des vitesses de rotation différentes pour récupérer successivement les éléments d'intérêt dans le culot (centrifugation différentielle) (figure 96)**, **soit appliquer une seule vitesse de sédimentation et récupérer à différentes hauteurs les éléments d'intérêt (centrifugation par gradients de densité) (figure 97)**.



b. Résultats et interprétation

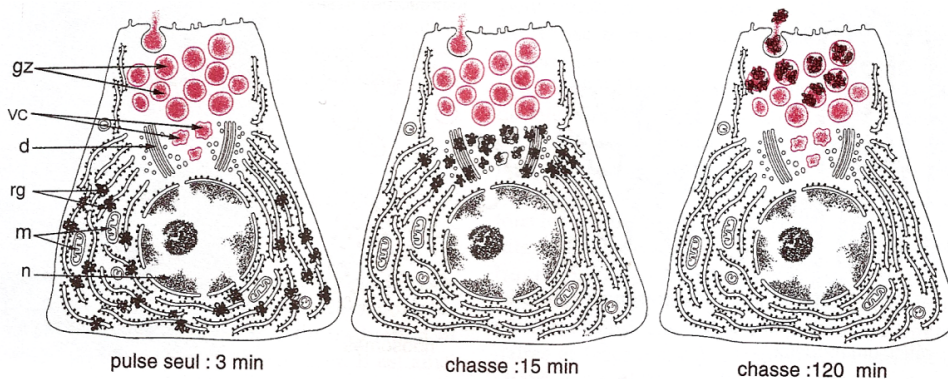
ENCART TECHNIQUE

Analyse cellulaire du processus sécrétoire

Ce processus a été analysé par une expérience de type *pulse-chase*, de la façon suivante :

- de fines tranches de tissu pancréatique frais sont mises en survie dans un milieu de culture permettant aux cellules de vivre et de fonctionner pendant quelques heures ;
- de la leucine tritiée (radioactive) est ajoutée au milieu ; celle-ci étant un précurseur des protéines, elle s'y incorpore au cours de l'expérience ;
- une incubation courte (moins de 5 minutes) est suivie d'un rinçage soigneux des cellules, pour éliminer toute radioactivité soluble, et de leur remise dans un milieu normal ;
- des échantillons de tissus sont ensuite prélevés régulièrement (toutes les 20 minutes environ) pendant deux heures, puis fixés et traités pour la microscopie électronique ;
- les coupes obtenues sont traitées pour l'autoradiographie à haute résolution, les grains d'argent observés révélant la présence de protéines radioactives au sein des ultrastructures.

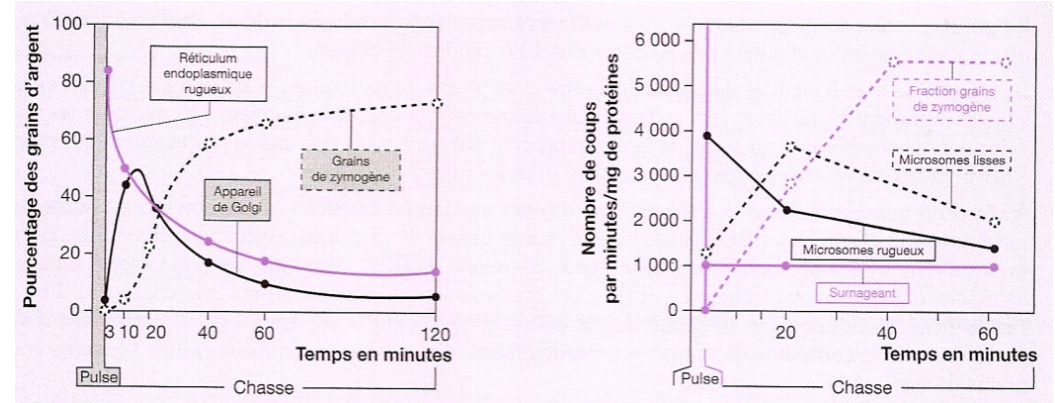
▲ FIGURE 98. Principe du pulse-chase dans les expériences de PALADE. D'après CALLEN (2005).



Expériences historiques sur la sécrétion des protéines par les cellules pancréatiques

Le phénomène sécrétoire est étudié au moyen d'expériences d'incorporation de leucine tritiée (de type *pulse-chase*), suivies d'autoradiographie. La radioactivité se déplace, au cours du temps, successivement dans les compartiments mis en jeu dans ce processus : réticulum endoplasmique rugueux (rg) ; appareil de Golgi (d) ; vésicules de concentration (vc) et grains de zymogène (gz) ; m : mitochondries ; n : noyau. (D'après J. Jamieson).

▲ FIGURE 99. Localisation des grains d'argent en fonction du temps : déplacement des acides aminés radioactifs dans la cellule. D'après CALLEN (2005).



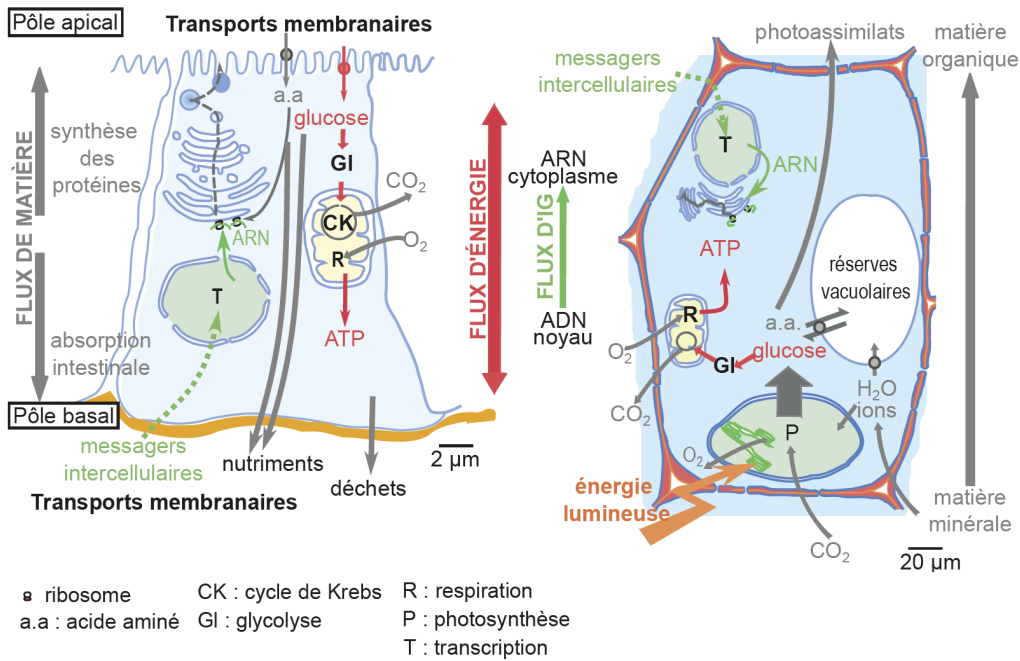
▲ FIGURE 100. Localisation de la radioactivité par compartiments (à gauche par comptage de grains d'argent ; à droite par dosage de radioactivité après ultracentrifugation).

Les **microsomes** correspondent au RE et les **grains de zymogènes** sont les **vésicules de sécrétion contenant les précurseurs d'enzymes pancréatiques**. D'après BREUIL (2007).

Éléments d'exploitation :

- Les méthodes de marquage radioactif permettent de **suivre le déplacement de molécules d'intérêt** dans les cellules au cours du temps.
- On voit par les trois méthodes que **les acides aminés radioactifs se concentrent initialement dans le réticulum endoplasmique granuleux (quelques min après pulse)**, puis **l'appareil de GOLGI (15 min environ)** puis sont finalement **stockés dans les grains de zymogènes** qui correspondent aux **vésicules de sécrétion** de la CAP.
- D'après nos connaissances, le REG est le lieu de **synthèse des protéines** destinées à la sécrétion (et aux membranes), ce qui tend à montrer que les **AA** servent de support à la production de **protéines**. Ensuite, l'appareil de GOLGI est un lieu de **modification et de stockage des protéines destinées à la sécrétion** (et aux membranes) et c'est aussi le second lieu de passage des AA probablement déjà intégrés en protéines (puisque provenant vraisemblablement du REG). Enfin, les grains de zymogènes sont le lieu d'**accumulation des protéines en attente de sécrétion** : ce sont des vésicules de sécrétion et on y retrouve naturellement l'essentiel des AA radioactifs donnés à la cellule lors du *pulse*.

3. La nature des principaux flux dans les cellules eucaryotes (au travers de l'exemple de l'entérocyte et de la cellule chlorophyllienne)



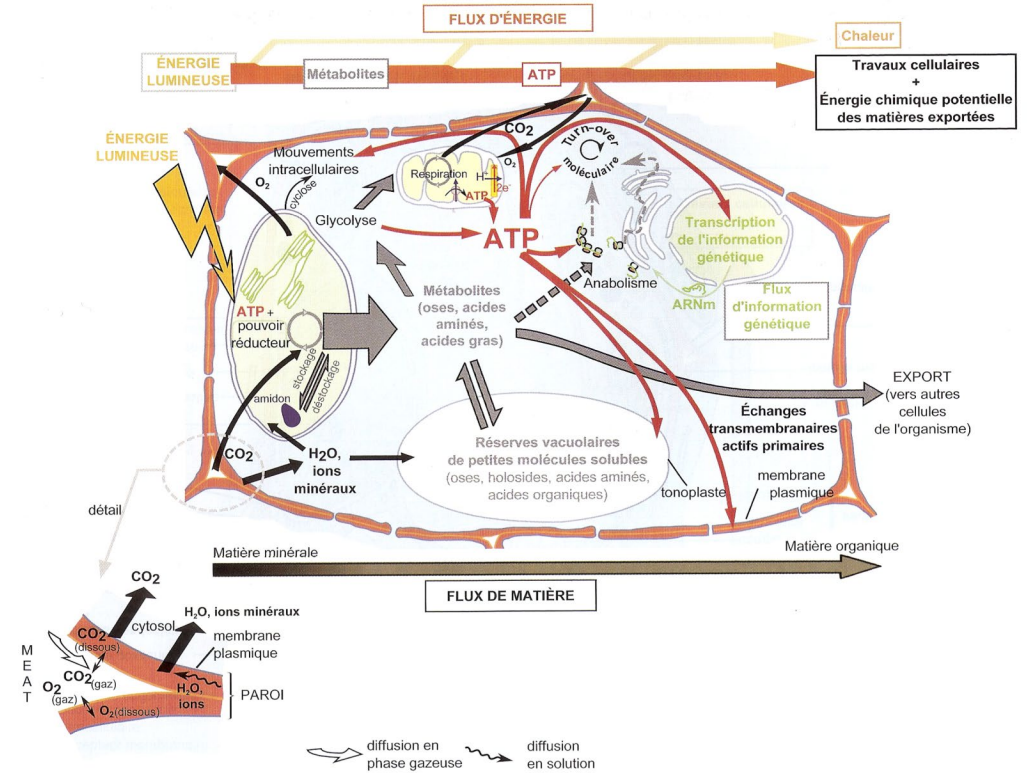
(a) Entérocyte

(b) Cellule du parenchyme palissadique

▲ FIGURE 101. Principaux flux dans une cellule eucaryote (vision ultra-simplifiée).
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

On pourra utilement compléter ces aspects avec les flux abordés dans le chapitre 5.

a. Des flux de matière

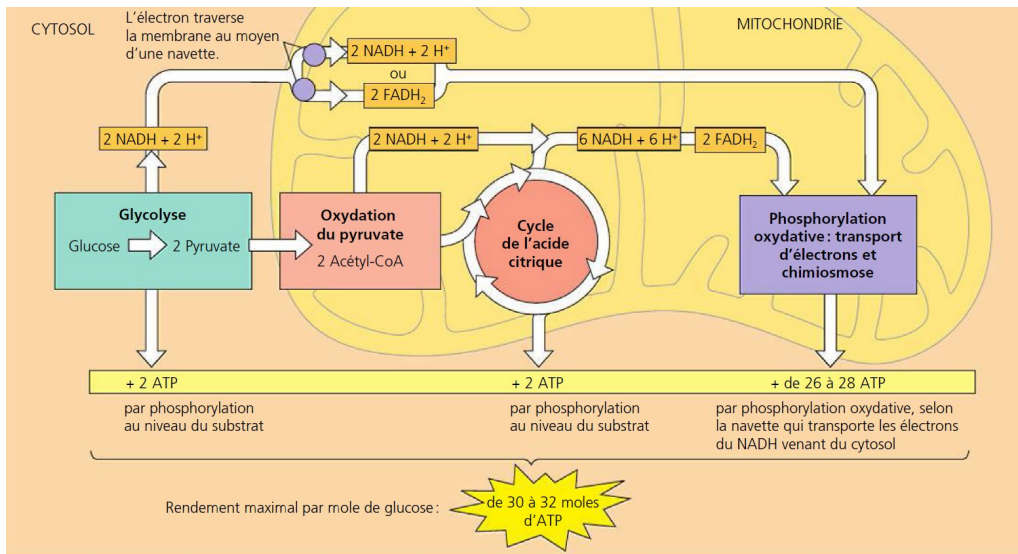


▲ FIGURE 102. Les flux dans la cellule parenchymateuse palissadique.
Corrigé d'après PEYCRU *et al.* (2013).

b. Des flux d'énergie

Voir les chapitres sur le métabolisme

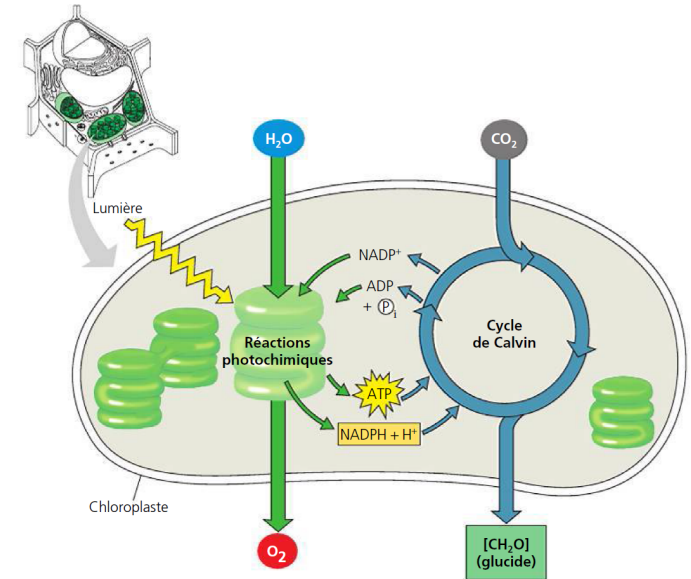
a. Une production catabolique d'ATP dans les deux types de cellules



▲ FIGURE 103. Une vision simplifiée du catabolisme.
D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

β. Une production photosynthétique de métabolites dans la CPP

Vue d'ensemble de la photosynthèse : intégration des réactions photochimiques et des réactions du cycle de Calvin. Les réactions photochimiques se déroulent dans la membrane des thylakoïdes, formant les grana, tandis que le cycle de Calvin a lieu dans le stroma. Les réactions photochimiques utilisent l'énergie solaire pour produire de l'ATP et du NADPH + H⁺, qui servent respectivement de source d'énergie chimique et de potentiel réducteur dans le cycle de Calvin. Au cours de celui-ci, le dioxyde de carbone sert à produire des molécules organiques qui seront ultérieurement transformées en glucides. (Souvenez-vous que la formule de la majorité des sucres simples est un multiple de [CH₂O].)



▲ FIGURE 104. Une vision synthétique de la photosynthèse végétale.
D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

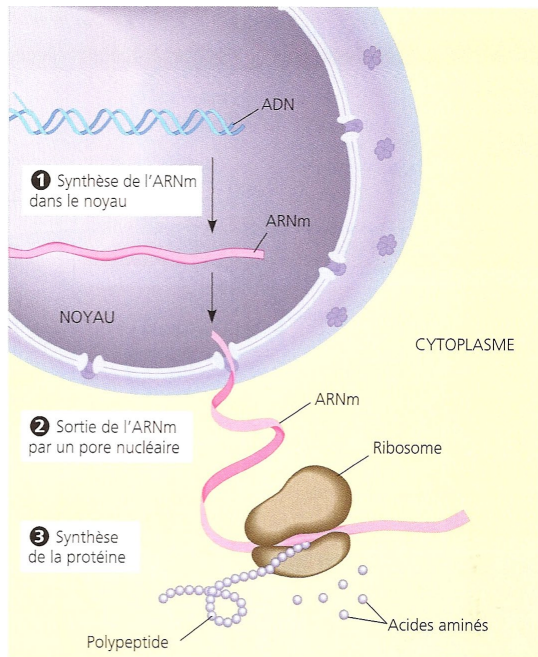
c. Des flux d'information

a. Un flux génétique : une expression séquentielle et compartimentée de l'information génétique

Voir le chapitre sur l'expression génétique

β. Un flux d'informations issues de signaux extérieurs à la cellule (communications intercellulaires ou stimuli environnementaux)

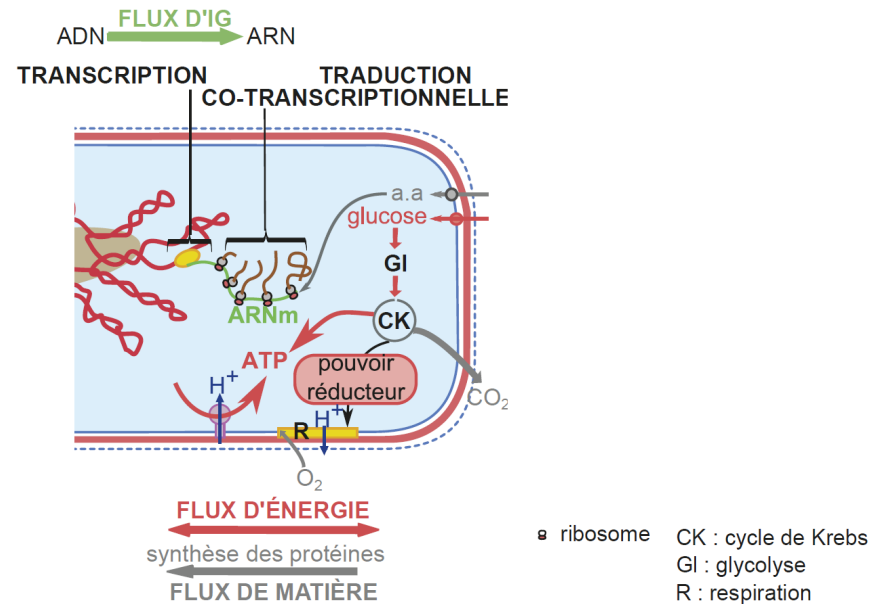
Voir BCPST2 (Communications intercellulaires)



ADN → ARN → protéine : schéma de la circulation de l'information dans une cellule. Dans une cellule eucaryote, l'ADN nucléaire programme la production de protéines en dictant la synthèse de l'ARN messager (ARNm). Celui-ci se déplace vers les ribosomes situés dans le cytoplasme et s'y fixe. Lorsqu'un ribosome (très grossi sur ce dessin) rencontre l'ARNm, le message génétique est traduit, et un polypeptide ayant une séquence spécifique d'acides aminés est formé.

▲ FIGURE 105. Expression de l'information génétique dans la cellule eucaryote.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

B. Des cellules procaryotes traversées par des flux cytoplasmiques et des échanges avec le milieu extracellulaire (dont le domaine pariétal)



▲ FIGURE 106. Les flux dans une cellule eubactérienne (*E. coli*) : une vision très simplifiée.
D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021).

1. Des échanges de matière au niveau membranaire et pariétal

2. Des flux d'énergie avec la production catabolique d'ATP au niveau membranaire (en lien avec le périplasma où sont concentrés les protons)

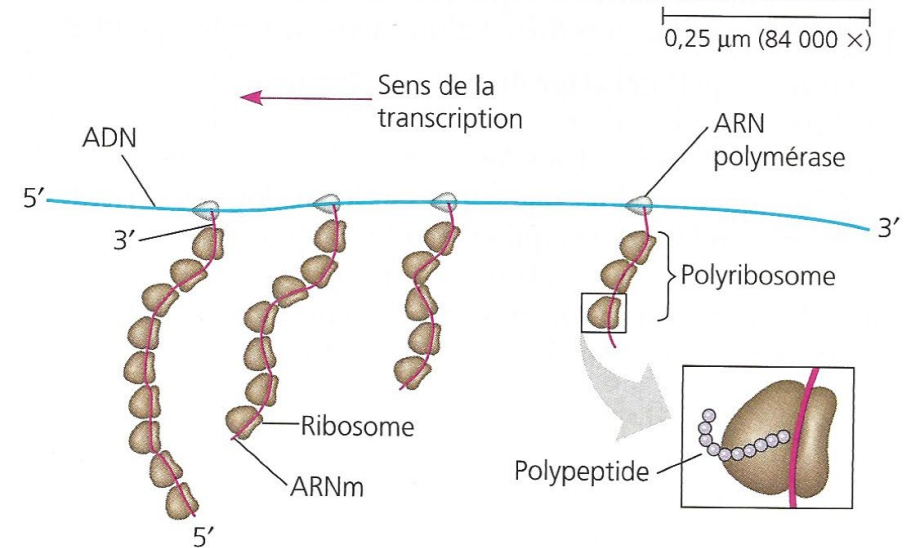
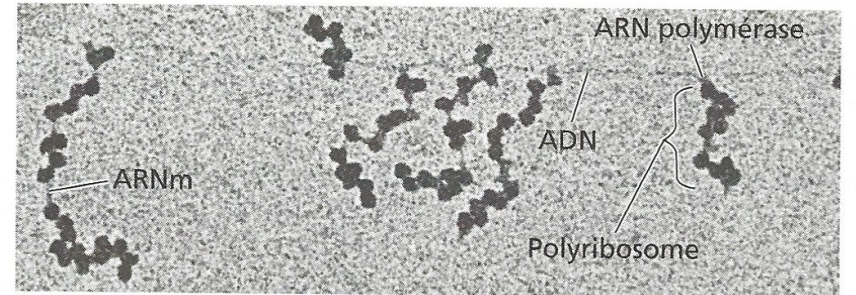
- **Organisme aérobic** : organisme qui vit en conditions oxygéniques et réalise la respiration cellulaire.
 - organisme aérobic strict : la respiration est obligatoire et donc l'organisme ne peut pas survivre sans dioxygène.
 - organisme aérobic facultatif : la respiration n'est pas obligatoire et donc l'organisme peut survivre sans dioxygène.
- **Organisme anaérobic** : organisme qui vit en conditions d'hypoxie (faible oxygénation) ou d'anoxie (absence de dioxygène), réalisant d'autres voies métaboliques productrices d'ATP que la respiration cellulaire.

3. Des flux d'information

a. Un flux génétique : une traduction co-transcriptionnelle dans le cytosol

Voir le chapitre sur l'expression génétique

b. Un flux d'informations issues de signaux extérieurs à la cellule



Couplage de la transcription et de la traduction chez les Archéobactéries et les Bactéries. Dans les cellules procaryotes, la traduction de l'ARNm peut commencer dès que la première extrémité (5') de la molécule d'ARNm se détache de la matrice d'ADN. La micrographie montre la transcription d'un brin d'ADN de *E. coli* par des molécules d'ARN polymérase. Chacune de celles-ci engendre un brin d'ARNm déjà en cours de traduction par les ribosomes. Les polypeptides nouvellement synthétisés ne sont pas visibles ici (MET).

Photographie reproduite avec la permission de O.L. Miller, B.A. Hamkalo et C.A. Thomas, Jr, *Science* 169 (1970). Copyright © 1970 American Association for the Advancement of Science.

▲ **FIGURE 107. La transcription des ARNm eubactériens et leur traduction immédiate.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **cellules** sont traversées par des **flux de matière, d'énergie et d'information**.
- ✓ Chez les **Eucaryotes**, une partie de ces **flux** transite par la **membrane plasmique** ou les **systèmes endomembranaires**. Ceci met en évidence la **coopération fonctionnelle** entre les **compartiments**.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

Le plan ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un outil d'apprentissage et de structuration des concepts importants. Vous pouvez en recopier les grandes lignes ou annexer le plan du polycopié directement.

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

- **Compartimentation eucaryote**

- ° **Membrane** biologique
- ° **Entérocyte**
- ° **Cellule acineuse**
- ° **Organites** au programme : **REG, REL, Golgi, ((péroxyosome)), vacuole, mitochondrie, chloroplaste, noyau, lysosome...** avec schémas de **fonctionnement** au besoin
- + savoir **diagnostiquer** des électrographies
- ° **Ribosome**
- ° **Endosymbioses** (I / II)

- **Bactéries**

- ° **Paroi GRAM + / -** [savoir expliquer la coloration et la constitution]
- [° Porines]
- ° **Échanges** au niveau de la paroi et du plasmalemme
- ° **Organisation** d'une Bactérie type
- ° Typologie de la **compartimentation** : GRAM + / GRAM - / Cyanobactérie
- [° **Cyanobactérie** > **BCPST2**]
- ° **Flagelle bactérien**

- **Tableau de comparaison des génomes**

- **Cytosquelette**

- ° Organisation des **microtubules**
- ° Organisation des **filaments intermédiaires**
- ° Organisation des **microfilaments**
- ° **Actine en réseau** / Actine en **faisceau**
- ° **Stabilisation / coiffage des MF**
- ° **Transport vésiculaire / dynéine et kinésine**
- [° Avoir compris les **modes d'assemblages de MT-MR**, savoir les expliquer, y compris les notions de *treadmilling* et instabilité dynamique]
- ° **Microvillosité**
- [° **Sarcomère, contraction musculaire...** > **BCPST2**]
- ° **Cyctose**
- ° **Axonème** et son fonctionnement
- ° **Fuseau mitotique**
- ° **Ascension polaire** des chromatides
- ° **Anneau contractile**
- ° **Lamines** et **vésicularisation** du noyau

- Flux

- [° **Flux transmembranaires** de l'entérocyte > **chapitre 7**]
- ° **Autoradiographie**
- [° **Ultracentrifugation** : savoir expliquer]
- ° **Expériences de PALADE** : savoir expliquer / schématiser
- ° **Flux dans l'entérocyte** (s'inspirer des autres schémas, dont ceux du **chapitre 5**)
- ° **Flux dans la CPP**
- ° **Catabolisme oxydatif**
- ° **Photosynthèse**
- ° **Expression génétique** (basique)
- ° **Flux dans une Bactérie**
- [° **Traduction co-transcriptionnelle**]

Vous devez en outre **savoir / pouvoir** :

Références

- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition*. Flammarion, Paris. Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Première édition américaine 1983 (1986 1^{re} édition française).
- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2008). *Molecular Biology of the Cell. Fifth Edition*. 1st edition 1983. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, D. MORGAN, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2015). *Molecular Biology of the Cell. Sixth Edition*. 1st edition 1983. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- ALBERTS, B., D. BRAY, K. HOPKIN, A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2014). *Essential Cell Biology. Fourth Edition*. 1st edition 1998. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- BASSAGLIA, Y. (2013). *Biologie cellulaire*. Maloine, Paris, 3^e édition.
- BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).
- BOUJARD, D. (dir.). B. ANSELME, C. CULLIN & C. RAGUÉNÈS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES*. 2^e édition (1^{re} édition 2012), Dunod, Paris.
- BOUTIN, V., L. GERAY, Y. KRAUSS & C. VILBERT (2015). *Atlas de biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- BREUIL, M. (2007). *Biologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BREUIL, M. (2009). *Biologie 2^e année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BUCHANAN, B. B., W. GRUISSEM & R. L. JONES (dir.) (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Wiley, New York, USA – Blackwell, Oxford, UK, 2e édition (1e édition 2002).
- CALLEN, J.-C. (2005). *Biologie cellulaire. Des molécules aux organismes*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1999).
- CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles, 2^e édition (1^{re} édition 1995).
- [CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERMAN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie*. Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e édition).
- COOPER, G. M. (2019). *Cell. A Molecular Approach*. 8th édition, Sinauer / Oxford University Press, Oxford (GB).
- DARRIBÈRE, T. (2002). *Introduction à la biologie du développement*. Belin, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DENGEUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENGEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENGEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- EDELBLUM, K. L. & J. R. TURNER (2015). *Epithelial Cells: Structure, Transport, and Barrier Function*. Pp. 187-210. In: J. MESTECKY, W. STROBER, M. W. RUSSEL, B. L. KELSALL, H. CHEROUTRE & B. N. LAMBRECHT (dir.). *Mucosal Immunology*. Fourth edition. Elsevier, Amsterdam, 2247 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415847-4.00012-4>

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse*. Ellipses, Paris.

LATRUFFE, N. (dir.), F. BLEICHER-BARDETTI, B. DUCLOS & J. VAMECQ (2014). *Biochimie. Tout le cours en fiches. Licence. PACES-UE1. CAPES*. Dunod, Paris.

LELIÈVRE, É., J. DENÈUD, J. ROQUES, É. HAMARD-PÉRON & M. AIRAUD (2018). *Biologie*. Dunod, Paris.

LÜLLMANN-RAUCH, R. & E. ASAN (2019). *Taschenlehrbuch Histologie*. 6^e édition allemande (1^{er} édition 2003). Thieme, Stuttgart (D).

MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2004).

MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et collaborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie*. Frison-Roche, Paris.

PÉRILLEUX, É., D. RICHARD, B. ANSELME, J.-M. DEMONT & P. VALET (2002). *Biologie humaine. Anatomie, physiologie, santé*. Nathan, Paris, 2^e édition.

PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOHLRÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Malakoff (F).

PETIT, J.-M. & R. JULIEN (2007). *Mini-manuel de Génétique*. Dunod, Paris.

PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010a). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 2^e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1^{er} édition 2006).

PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010b). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2017). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 4^e édition (1^{er} édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2018). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 2007).

PORTER, K. R. & M. A. BONNEVILLE (1973). *Structure fine des cellules et des tissus*. 2^e édition française (1^{er} édition 1969). Traduction de la troisième édition américaine (1968) par C. FAVARD-SÉRÉNO sous la direction de P. FAVARD. Ediscience, Paris, 196 pages.

RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007). *Biologie*. De Boeck, Bruxelles.

RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2010).

ROBERT, D. & J.-C. ROLAND (1998). *Biologie végétale. Caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. 1. Organisation cellulaire*. Doin, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1989).

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, A. DENIS, L. GERAY & I. MOLLIÈRE (2021). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2017).

SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1^{re} année*. Ellipses, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2^e année*. Ellipses, Paris.

TAIZ, L. & E. ZEIGER (dir.) (2010). *Plant physiology*. Sinauer Associates, Sunderland (Massachusetts, USA), 5^e édition (1^{er} édition 1991).

VIGNAIS, P. (2001). *La Biologie des origines à nos jours. Une Histoire des idées et des hommes*. « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

VIGNAIS, P. (2006). *Science expérimentale et connaissance du Vivant. La Méthode et les concepts*. « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

SILVERTHORN, D. U., avec W. C. OBER, C. W. GARRISON, A. C. SILVERTHORN & B. R. JOHNSON (2007). *Physiologie humaine. Une approche intégrée*. Pearson Education France, Paris, 4^e édition américaine traduite sous la dir. de J.-F. BRUN.

[VANDER, A. J.], E. P. WIDMAIER, H. RAFF & K. T. STRANG (2013). *Physiologie humaine. Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme*. Maloine, Paris, 6^e édition.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
I. Des cellules limitées par une membrane, variablement compartimentées et présentant une information génétique	2
A. Une limitation des cellules et des compartiments par des membranes biologiques	2
B. Une haute compartimentation des cellules eucaryotes impliquant une spécialisation et une coopération des volumes cellulaires	2
1. Nature et conséquences fonctionnelles de la compartimentation	2
a. Notions de compartiment et d'organites	2
b. Intérêts de la compartimentation cellulaire	2
c. Limites et contraintes de la compartimentation cellulaire	2
2. Le cytosol ou hyaloplasme, liquide fondamental de la cellule contenant des enzymes nombreuses et des ribosomes	3
3. Le noyau, organite bimembranaire rassemblant l'essentiel du matériel génétique de la cellule	3
4. Un ensemble de compartiments plutôt monomembranaires impliqués dans les flux vésiculaires : le système endomembranaire	6
a. Le réticulum endoplasmique granuleux (REG) ou rugueux (RER), ensemble de citernes couvertes de ribosomes où mûrissent les protéines sécrétées, membranaires ou du système endomembranaire	6
b. Le réticulum endoplasmique lisse (REL), réseau tubulaire où a lieu la synthèse des lipides membranaires (voire des hormones stéroïdes ou des triglycérides) et le stockage de calcium (notion de calciosome)	7
c. L'appareil de GOLGI, ensembles des dictyosomes où sont modifiées les protéines sécrétées / membranaires / du réseau endomembranaire et où certains composés matriciels glucidiques sont synthétisés [incl. vésicules d'exocytose]	7
d. Les lysosomes, organites de taille vésiculaire, acides, riches en enzymes hydrolytiques digérant les molécules endocytées et les organites endommagés [cellules animales]	8
e. La vacuole (ou les vacuoles), compartiment turgescent à rôles multiples (osmose, réserve, recyclage moléculaire, squelette...) [cellules végétales]	10
5. Les péroxysomes, organites de taille vésiculaire assurant le métabolisme des ROS et d'autres réactions, dont une partie de la photorespiration végétale [+ notion de <i>microbody</i>]	11
6. Des organites semi-autonomes pluricompartimentés intervenant dans le métabolisme énergétique : mitochondries et plastides	11
a. Les organites semi-autonomes : organites capables de produire des polypeptides et issus d'une endosymbiose	11
b. L'endosymbiose (primaire ou secondaire) des organites semi-autonomes : arguments et modalités	11
α. Notion d'endosymbiose et arguments	11
β. Endosymbiose primaire (cas des mitochondries de tous les Eucaryotes et des plastides de la Lignée verte) vs. endosymbiose secondaire (cas des plastides d'autre lignées)	11
c. Les mitochondries, organites assurant la respiration cellulaire et participant à des réactions anaboliques [toutes cellules eucaryotes]	12
d. Les chloroplastes, organites réalisant la photosynthèse [cellules végétales]	13
e. L'existence d'autres types fonctionnels de plastides dans des cellules autres que les cellules chlorophylliennes [cellules végétales]	13
7. Bilan : vue d'ensemble des organites	14
C. Une organisation des cellules bactériennes notamment caractérisée par une compartimentation faible	16
1. Une membrane plasmique, une paroi et d'éventuelles expansions	16

a. Une membrane plasmique semblable à celle des Eucaryotes	16	3. Des composés structurant et organisant la cellule	28
b. Une paroi à rôle squelettique de deux types : GRAM + et GRAM –	16	a. Cas des microtubules	29
c. Des échanges autorisés par la membrane et la paroi, ainsi que la respiration cellulaire	19	α. Dans les cellules animales	29
d. L'existence possible d'une expansion de la paroi (capsule, mucilages...) et la capacité de former des biofilms	19	i. Dans la plupart des cellules : une armature en étoile rayonnant à partir du centrosome	29
2. Une compartimentation faible à inexistante	19	ii. Dans la plupart des cellules épithéliales : une armature dont les unités présentent une disposition essentiellement parallèle	30
a. L'absence fréquente de système endomembranaire chez les Eubactéries, mais une ébauche de compartimentation chez les Gram – liée au périplasma	19	iii. Dans les expansions cytoplasmiques motiles pourvues d'un axonème ou undulipodia (cils, flagelles)	30
b. Un cytoplasme généralement monocompartimenté comprenant du cytosol, des ribosomes, des inclusions et l'information génétique	19	β. Dans les cellules végétales : un positionnement circulaire périphérique en interphase (et une disposition variable en division)	30
c. La présence de thylakoïdes chez les Cyanobactéries	19	b. Cas des microfilaments d'actine	31
3. La présence possible d'expansions (pili, flagelles bactériens)	21	α. Dans les cellules animales épithéliales : un réseau plutôt périphérique participant au maintien de la forme cellulaire et structurant les microvillosités	31
D. Une information génétique dans chaque cellule	21	β. Dans d'autres types de cellules : une organisation et une dynamique en lien avec la fonction	31
1. Chez les Eucaryotes : une information génétique compartimentée, scindée en une composante principale nucléaire et une composante mineure dans les organites semi-autonomes	21	γ. Dans les cellules végétales : un réseau qui organise en partie l'intérieur de la cellule (si l'on excepte le rôle de la vacuole turgescence)	31
2. Chez les procaryotes : une information génétique cytoplasmique scindée en une composante principale, le chromosome bactérien (dans le nucléoïde), et une composante mineure fréquente, les plasmides	21	c. Cas des filaments intermédiaires : dans le noyau de toutes les cellules eucaryotes (lamines nucléaires) et dans le cytosol des cellules animales	31
II. Des cellules organisées par un squelette interne dynamique qui intervient dans leur fonctionnement : le cytosquelette	22	4. Des composés impliqués dans le fonctionnement et le dynamisme cellulaires	31
A. Le cytosquelette eucaryote : un réseau protéique impliqué dans la structuration et le fonctionnement cellulaires	22	a. Le trafic vésiculaire et le déplacement d'organites	31
1. Une armature protéique en réseau à localisation surtout cytosolique : trois types de constituants principaux en interaction avec des protéines associées	23	α. Un déplacement sur le réseau de microtubules (dynéines, kinésines), notamment dans les cellules animales	31
a. Les éléments de cytosquelette (<i>stricto sensu</i>) : trois grands types de constituants	24	β. La possibilité d'utiliser le réseau d'actine, particulièrement dans les cellules végétales (myosines) : l'exemple de la cyclose	31
α. Les microtubules (MT) : des filaments cylindriques creux et orientés, composés de treize protofilaments de dimères de tubulines α-β	24	b. Les processus de motilité cellulaire, déformation et migration	32
β. Les filaments intermédiaires (FI) : des composés protéiques variés typiquement assemblés en dimères / tétramères / protofilaments / filaments [non orientés]	24	α. La contraction musculaire permise par le couple actine-myosine	32
γ. Les microfilaments (MF = μM) d'actine : deux chaînes torsadées orientées (actine filamentueuse = actine F) composées d'actine globulaire (actine G)	25	β. Le déplacement des cils et flagelles permis par le couple microtubules-dynéine au sein de l'axonème	33
b. Les protéines accessoires (= annexes = associées) du cytosquelette : une grande diversité d'agents protéiques interagissant avec le cytosquelette	25	γ. La déformation et la migration de cellules animales permises par une réorganisation des éléments de cytosquelette et des jonctions transitoires avec la matrice extracellulaire	33
α. Les protéines de pontage : des protéines assurant l'association des éléments de cytosquelette en faisceaux ou en réseau	25	c. Les processus dynamiques associés aux divisions cellulaires	33
β. Les protéines de coiffe : des protéines empêchant la dépolymérisation des extrémités de microtubules ou de microfilaments	25	α. La migration des chromosomes au cours de la division : un couplage entre la polymérisation-dépolymérisation des microtubules du fuseau de division et des protéines motrices	33
γ. Les protéines de stabilisation ou de déstabilisation : des protéines contrôlant la stabilité des éléments de cytosquelette	25	β. La constriction entre cellules filles lors de la cytodivision animales : un couplage actine-myosine	34
δ. Les protéines d'association aux membranes (protéines d'ancrage) et les protéines de liaisons aux jonctions cellulaires (protéines de liaisons)	26	γ. La séparation des cellules filles lors de la cytodivision végétale : un couplage microtubules / protéines motrices	34
ε. Les protéines motrices (= nanomoteurs = moteurs moléculaires) : des protéines qui se déplacent (de manière ATP-dépendante) sur le cytosquelette et assurent la motilité cellulaire	26	δ. La vésicularisation du noyau et sa reformation : la phosphorylation-déphosphorylation des lamines nucléaires	34
2. Des éléments qui s'assemblent selon des modalités précises et avec une dynamique particulière (<i>in vivo</i> ou <i>in vitro</i>)	26	B. Le cytosquelette bactérien : l'identification de protéines homologues aux protéines cytosquelettiques eucaryotes	36
a. Les microtubules : des éléments polymérisables et dépolymérisables (en lien avec la GTP / la GDP)	26	1. La protéine FtsZ, protéine homologue de la tubuline	36
b. Les microfilaments d'actine : des éléments polymérisables et dépolymérisables (en lien avec l'ATP / l'ADP)	27	2. Les protéines FtsA, MreB et ParM, protéines homologues de l'actine	36
c. Les filaments intermédiaires : des éléments autoassemblés mais dissociables par phosphorylation	28	3. La crescentine, protéine homologue des filaments intermédiaires	36
		4. Des protéines cytosquelettiques propres sans homologie avec le cytosquelette eucaryote	37

III. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux de matière, d'énergie et d'information	38
A. Des cellules eucaryotes traversées par des flux impliquant des échanges avec l'extérieur et une coopération entre compartiments	38
1. Spécialisation et coopération des compartiments entre eux et avec le milieu extracellulaire	38
a. Une complémentarité nécessaire	38
b. Les modalités des flux entre compartiments ou avec l'extérieur de la cellule : transferts transmembranaires, translocation, trafic vésiculaire	38
2. Mise en évidence d'un flux sécrétoire (= cycle sécrétoire) dans les cellules acineuses pancréatiques : les expériences historiques de PALADE (années 1960)	39
a. Principe des expériences	39
α. Principe du <i>pulse-chase</i> : le suivi d'un élément radioactif dans le temps et l'espace	39
β. Obtention de résultats : autoradiographie, comptage de grains d'argent, ultracentrifugation avec dosage de radioactivité	39
b. Résultats et interprétation	39
3. La nature des principaux flux dans les cellules eucaryotes (au travers de l'exemple de l'entérocyte et de la cellule chlorophyllienne)	41
a. Des flux de matière	41
b. Des flux d'énergie	42
α. Une production catabolique d'ATP dans les deux types de cellules	42
β. Une production photosynthétique de métabolites dans la CPP	42
c. Des flux d'information	42
α. Un flux génétique : une expression séquentielle et compartimentée de l'information génétique	42
β. Un flux d'informations issues de signaux extérieurs à la cellule (communications intercellulaires ou stimuli environnementaux)	42
B. Des cellules procaryotes traversées par des flux cytoplasmiques et des échanges avec le milieu extracellulaire (dont le domaine pariétal)	43
1. Des échanges de matière au niveau membranaire et pariétal	43
2. Des flux d'énergie avec la production catabolique d'ATP au niveau membranaire (en lien avec le périplasma où sont concentrés les protons)	43
3. Des flux d'information	44
a. Un flux génétique : une traduction co-transcriptionnelle dans le cytosol	44
b. Un flux d'informations issues de signaux extérieurs à la cellule	44
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	45
Plan du chapitre	46
Plan simplifié (3 niveaux de plan)	48
Plan très simplifié (2 niveaux de plan)	49

Plan simplifié (3 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
I. Des cellules limitées par une membrane, variablement compartimentées et présentant une information génétique	2
A. Une limitation des cellules et des compartiments par des membranes biologiques	2
B. Une haute compartimentation des cellules eucaryotes impliquant une spécialisation et une coopération des volumes cellulaires	2
1. Nature et conséquences fonctionnelles de la compartimentation	2
2. Le cytosol ou hyaloplasme, liquide fondamental de la cellule contenant des enzymes nombreuses et des ribosomes	3
3. Le noyau, organite bimembranaire rassemblant l'essentiel du matériel génétique de la cellule	3
4. Un ensemble de compartiments plutôt monomembranaires impliqués dans les flux vésiculaires : le système endomembranaire	6
5. Les péroxysomes, organites de taille vésiculaire assurant le métabolisme des ROS et d'autres réactions, dont une partie de la photorespiration végétale [+ notion de <i>microbody</i>]	11
6. Des organites semi-autonomes pluricompartimentés intervenant dans le métabolisme énergétique : mitochondries et plastides	11
7. Bilan : vue d'ensemble des organites	14
C. Une organisation des cellules bactériennes notamment caractérisée par une compartimentation faible	16
1. Une membrane plasmique, une paroi et d'éventuelles expansions	16
2. Une compartimentation faible à inexistante	19
3. La présence possible d'expansions (pili, flagelles bactériens)	21
D. Une information génétique dans chaque cellule	21
1. Chez les Eucaryotes : une information génétique compartimentée, scindée en une composante principale nucléaire et une composante mineure dans les organites semi-autonomes	21
2. Chez les procaryotes : une information génétique cytoplasmique scindée en une composante principale, le chromosome bactérien (dans le nucléoïde), et une composante mineure fréquente, les plasmides	21
II. Des cellules organisées par un squelette interne dynamique qui intervient dans leur fonctionnement : le cytosquelette	22
A. Le cytosquelette eucaryote : un réseau protéique impliqué dans la structuration et le fonctionnement cellulaires	22
1. Une armature protéique en réseau à localisation surtout cytosolique : trois types de constituants principaux en interaction avec des protéines associées	23
2. Des éléments qui s'assemblent selon des modalités précises et avec une dynamique particulière (<i>in vivo</i> ou <i>in vitro</i>)	26
3. Des composés structurant et organisant la cellule	28
4. Des composés impliqués dans le fonctionnement et le dynamisme cellulaires	31
B. Le cytosquelette bactérien : l'identification de protéines homologues aux protéines cytosquelettiques eucaryotes	36
1. La protéine FtsZ, protéine homologue de la tubuline	36
2. Les protéines FtsA, MreB et ParM, protéines homologues de l'actine	36
3. La crescentine, protéine homologue des filaments intermédiaires	36
4. Des protéines cytosquelettiques propres sans homologie avec le cytosquelette eucaryote	37

III. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux de matière, d'énergie et d'information	38
A. Des cellules eucaryotes traversées par des flux impliquant des échanges avec l'extérieur et une coopération entre compartiments	38
1. Spécialisation et coopération des compartiments entre eux et avec le milieu extracellulaire	38
2. Mise en évidence d'un flux sécrétoire (= cycle sécrétoire) dans les cellules acineuses pancréatiques : les expériences historiques de PALADE (années 1960)	39
3. La nature des principaux flux dans les cellules eucaryotes (au travers de l'exemple de l'entérocyte et de la cellule chlorophyllienne)	41
B. Des cellules procaryotes traversées par des flux cytoplasmiques et des échanges avec le milieu extracellulaire (dont le domaine pariétal)	43
1. Des échanges de matière au niveau membranaire et pariétal	43
2. Des flux d'énergie avec la production catabolique d'ATP au niveau membranaire (en lien avec le périplasma où sont concentrés les protons)	43
3. Des flux d'information	44
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	45
Plan du chapitre	46
Plan simplifié (3 niveaux de plan)	48
Plan très simplifié (2 niveaux de plan)	49

Plan très simplifié (2 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
I. Des cellules limitées par une membrane, variablement compartimentées et présentant une information génétique	2
A. Une limitation des cellules et des compartiments par des membranes biologiques	2
B. Une haute compartimentation des cellules eucaryotes impliquant une spécialisation et une coopération devolumes cellulaires	2
C. Une organisation des cellules bactériennes notamment caractérisée par une compartimentation faible	16
D. Une information génétique dans chaque cellule	21
II. Des cellules organisées par un squelette interne dynamique qui intervient dans leur fonctionnement : le cytosquelette	22
A. Le cytosquelette eucaryote : un réseau protéique impliqué dans la structuration et le fonctionnement cellulaires	22
B. Le cytosquelette bactérien : l'identification de protéines homologues aux protéines cytosquelettiques eucaryotes	36
III. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux de matière, d'énergie et d'information	38
A. Des cellules eucaryotes traversées par des flux impliquant des échanges avec l'extérieur et une coopération entre compartiments	38
B. Des cellules procaryotes traversées par des flux cytoplasmiques et des échanges avec le milieu extracellulaire (dont le domaine pariétal)	43
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	45
Plan du chapitre	46
Plan simplifié (3 niveaux de plan)	48
Plan très simplifié (2 niveaux de plan)	49

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en décembre 2021 • Dernière actualisation : novembre 2023.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.