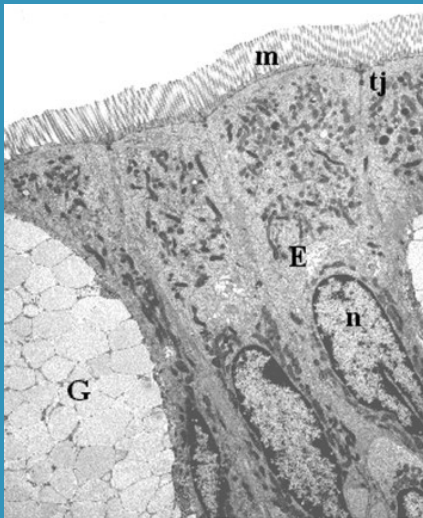
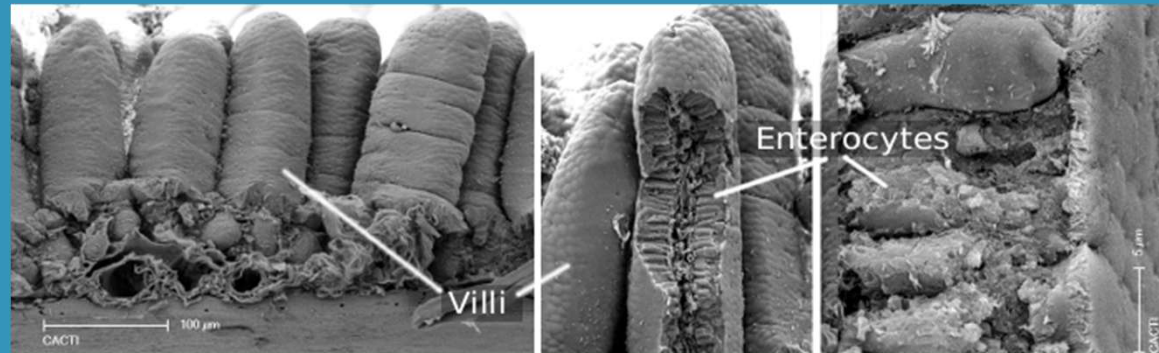


SV-C-2 ORGANISATION FONCTIONNELLE DE LA CELLULE

SV-C LA CELLULE DANS SON ENVIRONNEMENT



SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Savoirs visés	Capacités exigibles
<p>La cellule eucaryote est compartimentée, ce qui entraîne une régionalisation des fonctions et une coopération des compartiments dans le fonctionnement cellulaire.</p> <p>Le support de l'information génétique est présent dans plusieurs compartiments cellulaires.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Le cytosquelette des bactéries présente des protéines homologues à celui des cellules eucaryotes.</p> <p>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.</p>	<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. - 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). - 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.

Un peu d'histoire

Iers fossiles d'eucaryotes consensuels



Acritarche

- 1,6 Ga

Iers organismes pluricellulaires découverts au Gabon
Gabonionta : pro ou eucaryotes?

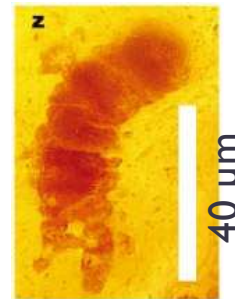
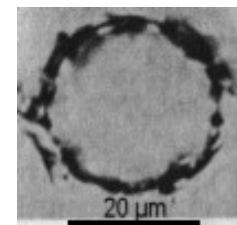


12 cm

Gabonionta

- 2,1 Ga

Restes attribués à des **Cyanobactéries**
(*Archaeosclerolites maxima*) → communauté
d'organismes autotrophes (Brasier et al. 2002).



- 3,4 Ga

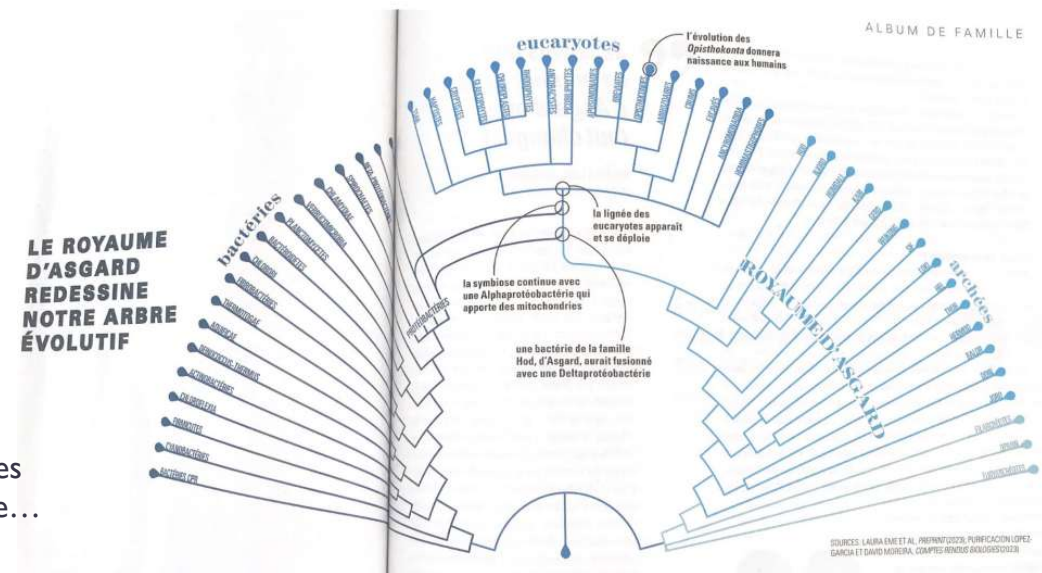
Cyanobactérie sphéroïde dans un minerai de fer rubané
Eobacterium isolatum et *Archaeophaeoïdes barbertonensis* (photo Pflug, La
Recherche 1976).

ci-contre : *Archaeophaeoïdes barbertonensis* (photo Pflug, La Recherche 1976)

Ières formes de
vie: unicellulaires
et procaryotes

FRAÎCHE ACTU

- En 2008 découverte de 3 **fumeurs noirs** dans partie Nord de dorsale Atlantique à bord du G.O. Sars à **320°C**, surnommés « château de Loki » → carotte de sédiments : **archées Asgard**
- millions de séquences d'ADN: projet génome Asgard par Christa Schleper et Thijs Ettema
 - combinaison de gènes archées et eucaryotes (notamment gènes du cytosquelette!!!).
 - Scepticisme de la communauté scientifique ...
 - ... puis découverte des Asgards dans les sédiments du Danube, puis Colorado
 - ✓ superembranchement des Asgards compte 18 lignées
 - ✓ démonstration de l'origine asgardienne des eucaryotes.
- Asgard = « pieuvre » :
 - **Véritable cytosquelette** avec protéine actine nommée **lokiactine**
 - **Chromosome circulaire** comme les bactéries, pas de mitochondries
 - Capacité de réaliser **symbiose** léguée aux futurs eucaryotes! En effet les Asgard vivent en lien étroit avec bactéries => possibilité d'endosymbiose... CQFD

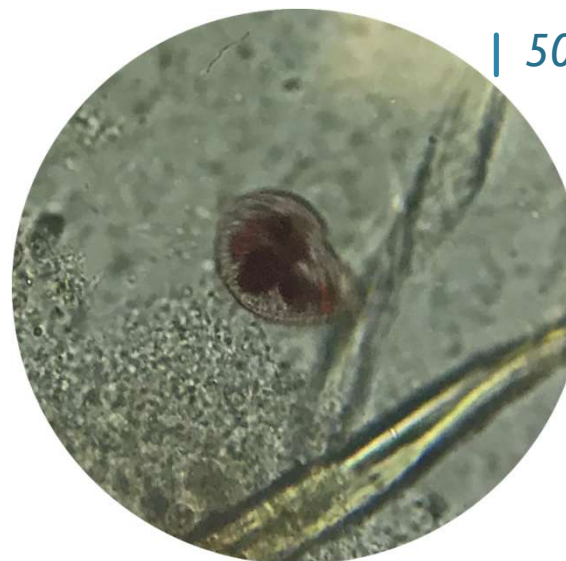


ÉTUDE DES FONCTIONS VITALES D'UN ORGANISME UNICELLULAIRE EUCARYOTE: LA PARAMÉCIE

La vie peut se définir comme la capacité à naître, à échanger avec le milieu, à sa reproduire, à évoluer et à mourir. Ces différentes capacités sont regroupées en 3 fonctions principales : la fonction de nutrition, la fonction de reproduction et la fonction de relation. **Chez les organismes unicellulaires, toutes les fonctions sont assurées par une seule cellule**



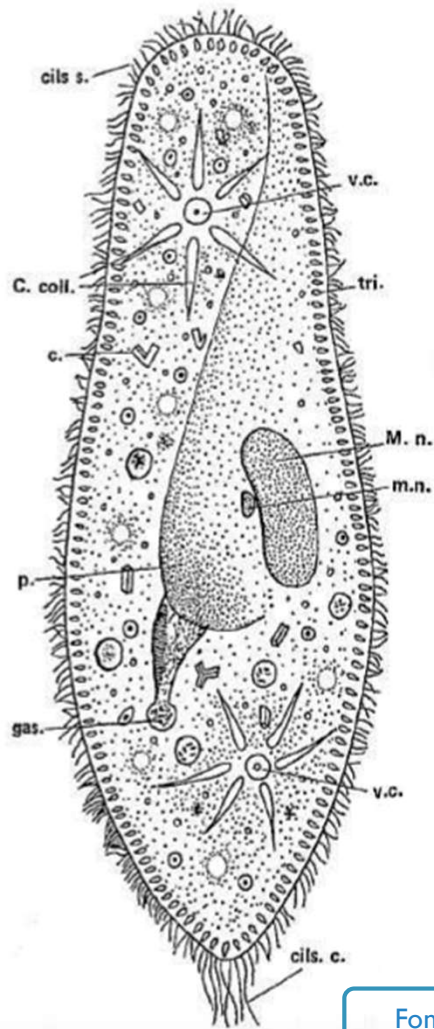
| 100 μm



| 50 μm

*Paramécie colorée au rouge
neutre et observée au MO
X100*

Mise en évidence de nombreux
organites participant aux 3
fonctions vitales de la paramécie



◀ Schéma structural d'une paramécie, selon Dragesco

c. = **cristaux** : on peut aussi rencontrer des concrétions calcaires ; leur présence ne s'explique guère.

C. coll. = **canaux collecteurs** : ils servent à amener l'eau du cytoplasme vers les vacuoles contractiles.

cils c. = **cils caudaux** : ils permettent l'orientation du déplacement et des changements brusques de direction.

cils s. = **cils somatiques** : ils battent de manière synchrone et permettent à l'organisme de se déplacer.

gas. = **gastriole** : c'est la vacuole alimentaire où sont conduits les aliments absorbés, et où a lieu la digestion.

Les déchets digestifs sont éliminés à un endroit déterminé de la paroi, appelé **cytoprocte**.

M. n. = **macro noyau** : il gère le quotidien vital cellulaire et s'occupe de la reproduction asexuée.

m. n. = **micro noyau** : il assure les fonctions sexuelles de reproduction avec échange génétique.

p = **peristome** : invagination ventrale vers laquelle la nourriture (surtout des bactéries) est envoyée par le mouvement des cils qui la bordent. Dans le fond se trouve la bouche, ou **cytostome**, qui ouvre sur un canal appelé **cytopharynx**, conduisant à la gastriole.

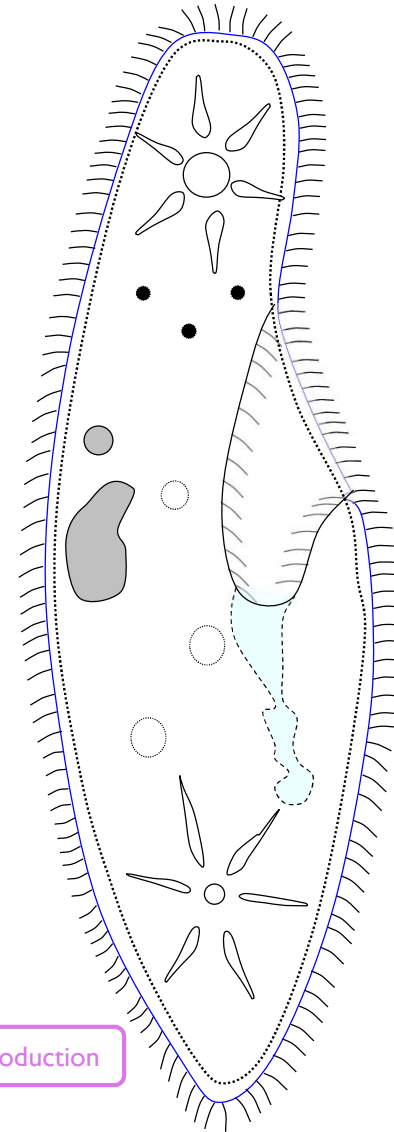
tri. = **trichocystes** : ce sont des organites situés sous la cuticule, qui peuvent projeter au dehors de longs filaments rigides (moyen de défense ?).

v.c. = **vacuoles contractiles** ou **pulsatiles** : elles ont la capacité d'évacuer l'excès d'eau qui se trouve dans le cytoplasme, et qui y pénètre par osmose.

Fonction de relation

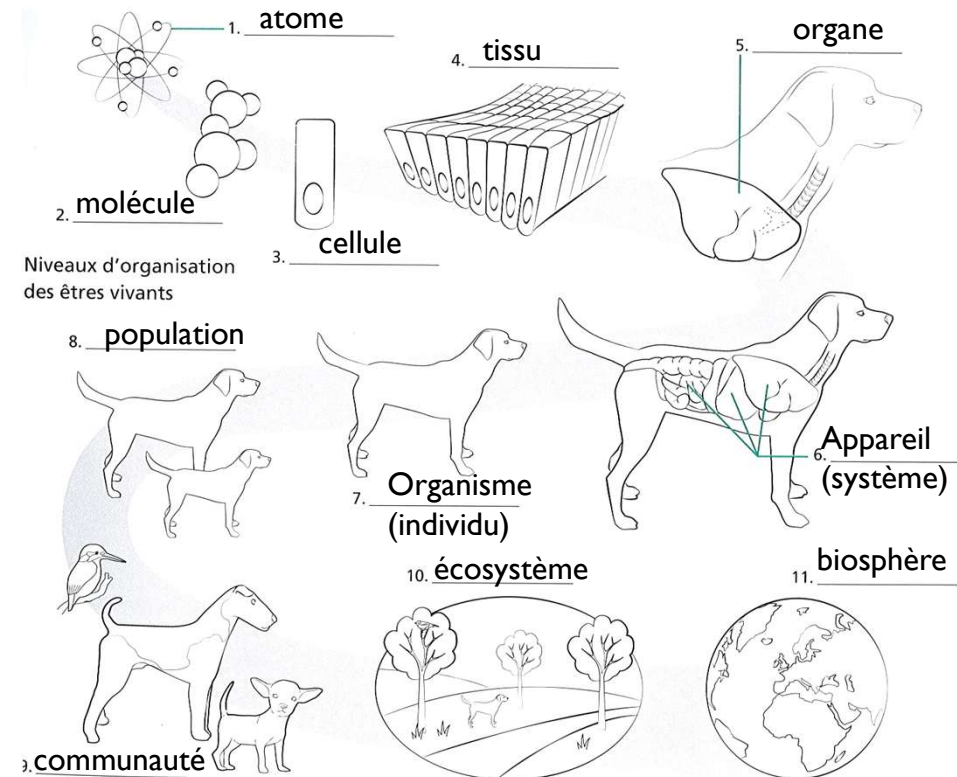
Fonction de nutrition

Fonction de reproduction

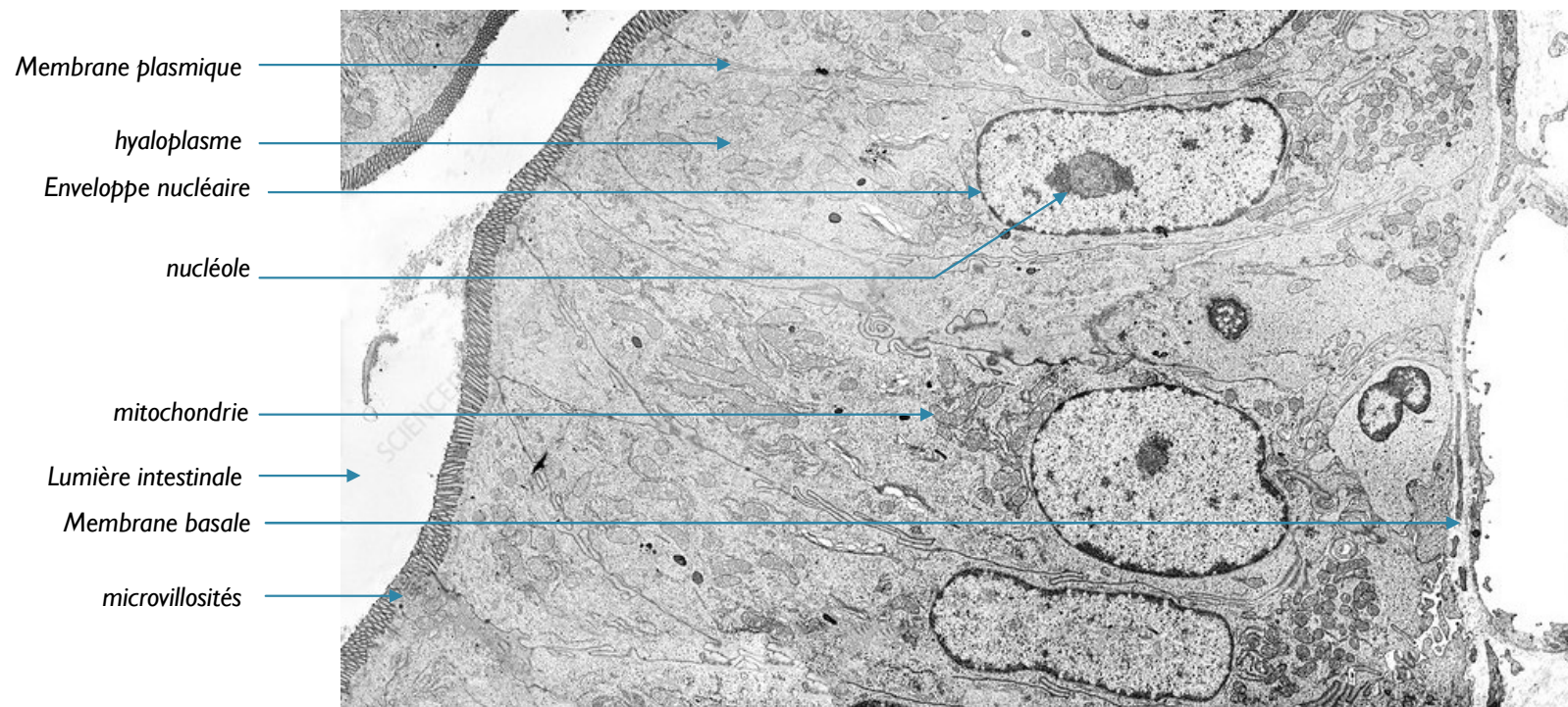


NIVEAUX D'ORGANISATION DU VIVANT

- point de vue fonctionnel, cellule = **plus petite unité autonome du vivant, capable de se nourrir, de se reproduire, et d'interagir avec son milieu.**
- point de vue structural, cellule = **un compartiment aqueux, le cytoplasme, délimité par une membrane plasmique de nature lipidique, et qui contient du matériel génétique sous forme d'ADN** (attention cet ADN peut être secondairement perdu chez certaines cellules différenciées comme les hématies des mammifères).
- 3 domaines du vivant : les **bactéries** (ou eubactéries), les **archées** et les **eucaryotes**, ces derniers étant d'un point de vue phylogénétique plus apparentés aux archées qu'aux bactéries.



Quelles sont les caractéristiques structurales et fonctionnelles des cellules ?



Electronographie d'une portion d'intestin grêle de mammifère observée au MET (barre d'échelle : 1 μ m) : entraînez-vous à légender cette photo

SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule

PLAN DU COURS

I. Les cellules : des unités autonomes plus ou moins compartimentées délimitées par une membrane plasmique

- A. Les cellules procaryotes : des cellules peu ou pas compartimentées délimitées par une ou deux membranes
 - 1. Organisation d'une cellule procaryote : exemple des bactéries
 - 2. Une compartimentation possible associée à une régionalisation du fonctionnement cellulaire
- B. Les cellules eucaryotes : des cellules compartimentées
 - 1. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique
 - 2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire
 - 3. Les lysosomes
 - 4. Les peroxysomes
 - 5. Les vacuoles
 - 6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif
 - 7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes
- C. Conséquences de la compartimentation cellulaire

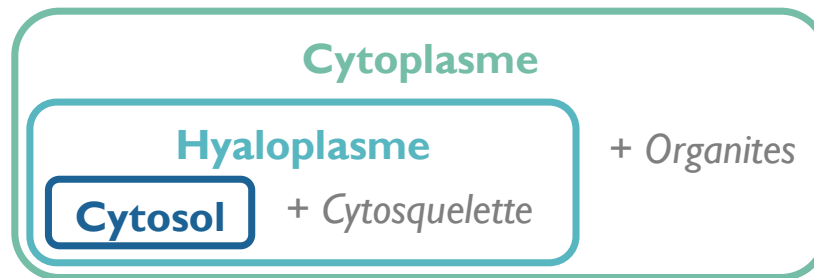
II. Le cytosquelette : armature protéique de la cellule impliquée dans sa structure et sa dynamique

- A. Les éléments du cytosquelette chez les cellules eucaryotes
 - 1. Les microfilaments d'actine
 - 2. Les filaments intermédiaires
 - 3. Les microtubules
 - 4. L'importance du cytosquelette dans la migration des cellules animales
- B. Des protéines homologues au cytosquelette eucaryote chez les bactéries

III. Les cellules : des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux

- A. Des flux de matière
- B. Des flux d'information
- C. Des flux d'énergie

I. LES CELLULES : DES UNITÉS AUTONOMES PLUS OU MOINS COMPARTIMENTÉES DÉLIMITÉES PAR UNE MEMBRANE PLASMIQUE



Cytosol* : n.m. (cyto- : cellule, -sol : solution) phase liquide du cytoplasme dans laquelle baignent les organites et le cytosquelette

Hyaloplasme* : n.m. (hyalos- : cristal, -plasme : transparent) ensemble formé par le cytosol et les protéines fibrillaires du cytosquelette

Cytoplasme* : n.m. ensemble formé par le cytosol, les protéines fibrillaires du cytosquelette et les organites

Compartiment	% du volume cellulaire
Hyaloplasme	54
Mitochondrie	22
REG	9
REL+ Golgi	6
Noyau	6
Peroxisomes	1
Lysosomes	1
Endosomes	1

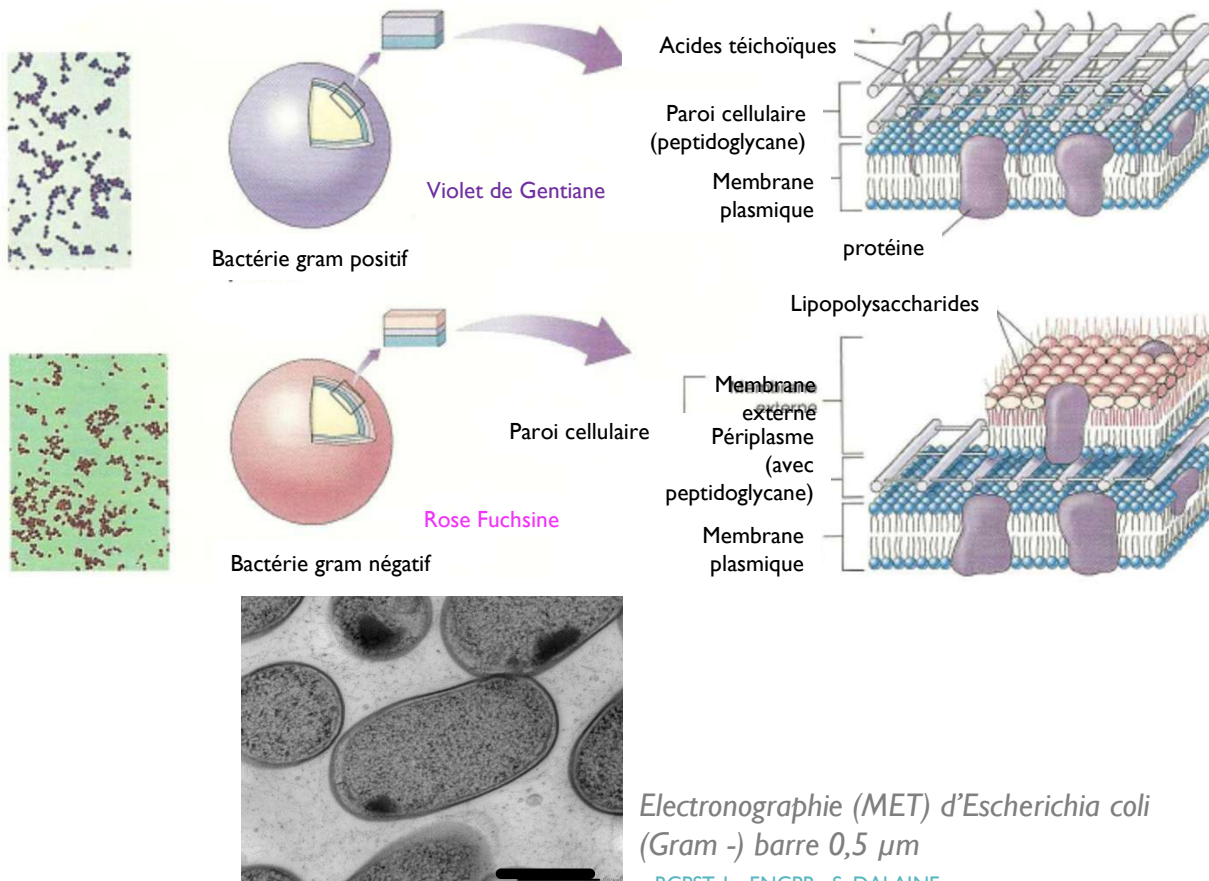
Volume du cytosol et des organites intracellulaires (en %) dans un hépatocyte

Organite : n.m. constituant cellulaire des cellules eucaryotes entouré d'au moins une membrane

Cytosquelette : n.m. ensemble de protéines fibrillaires structurant la cellule

A. LES CELLULES PROCARYOTES : DES CELLULES PEU OU PAS COMPARTIMENTÉES DÉLIMITÉES PAR UNE OU DEUX MEMBRANES

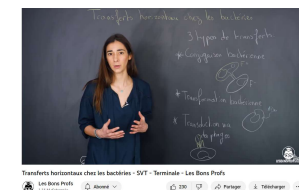
I. Organisation d'une cellule procaryote : exemple des bactéries

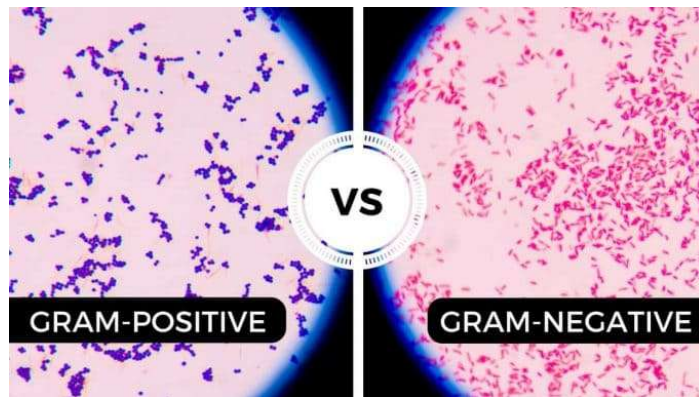


- Tout le contenu cellulaire baigne dans le cytosol
- ADN contenu dans une région = **nucléoïde** qui n'est pas délimitée
- Clé de détermination des bactéries basée sur **coloration Gram** et test à la catalase :
 - Les bactéries à **GRAM positif** présentent une **paroi épaisse** constituée de peptidoglycanes
 - Les bactéries à **GRAM négatif** présentent une fine paroi de peptidoglycanes surmontée d'une membrane externe, formée d'une bicouche de phospholipides particuliers.

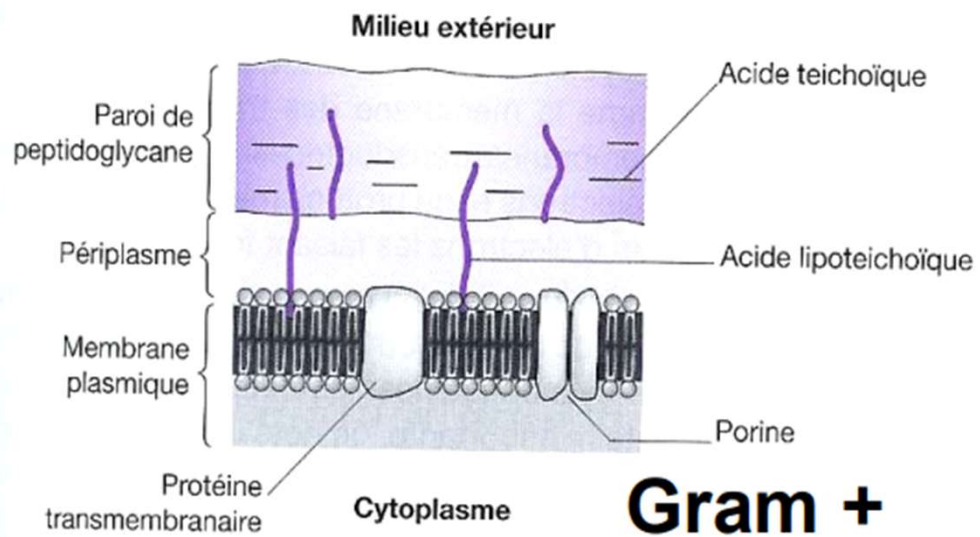
Electronographie (MET) d'*Escherichia coli* (Gram -) barre 0,5 μm

BCPST I - ENCPB - S. DALAINE

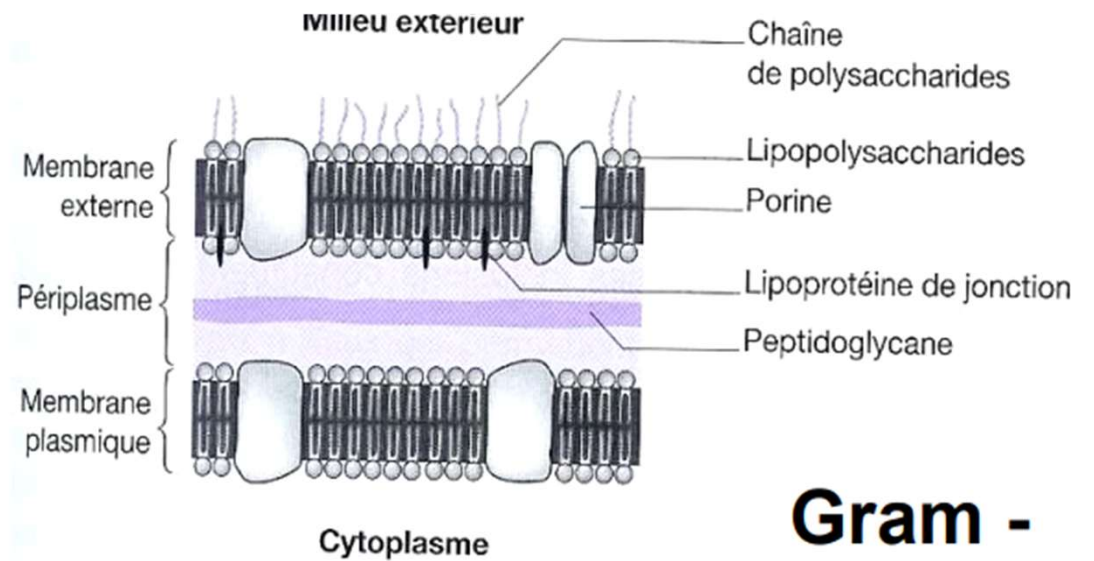




- **GRAM positif** = paroi épaisse de peptidoglycanes
- **GRAM négatif** = fine paroi + membrane externe

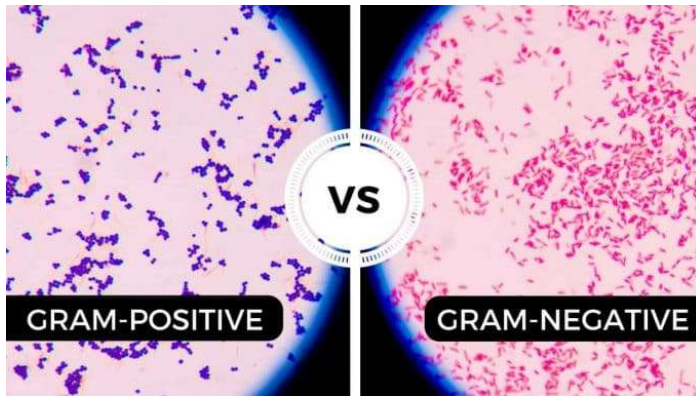


Gram +



Gram -



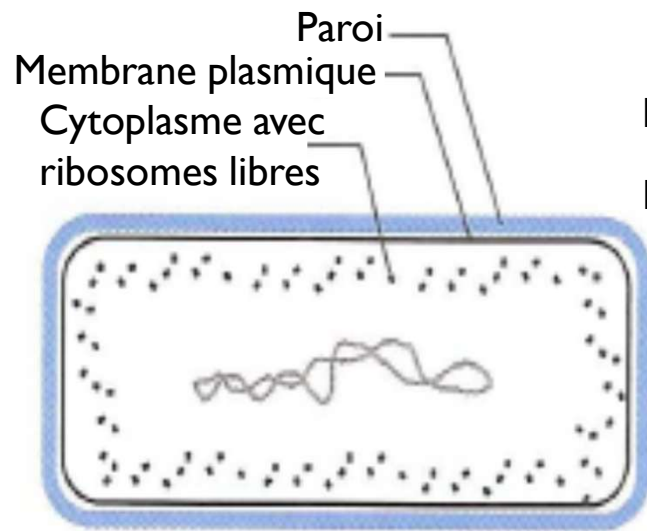


Bactérie Gram (+)

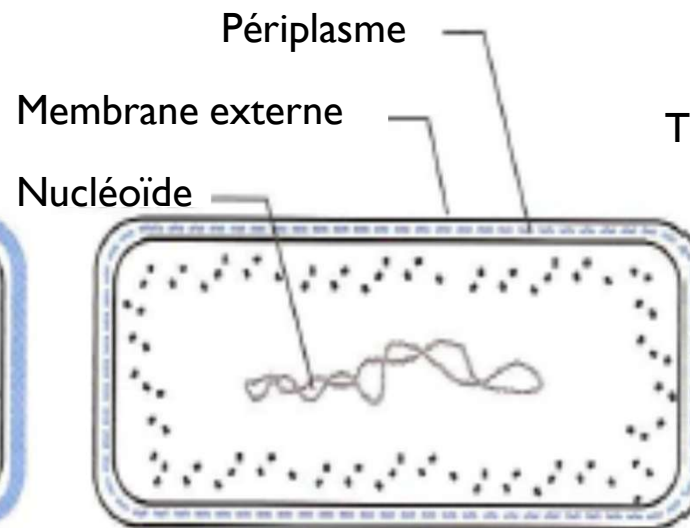
Bactérie Gram (-)

Cyanobactérie Gram (-)

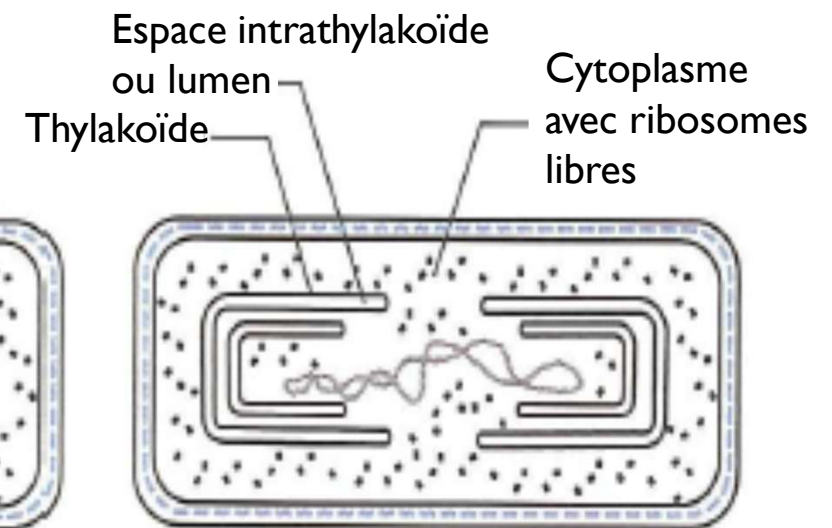
- **GRAM positif** = paroi épaisse de peptidoglycanes
- **GRAM négatif** = fine paroi + membrane externe



Absence de compartimentation



Ebauche de compartimentation ?



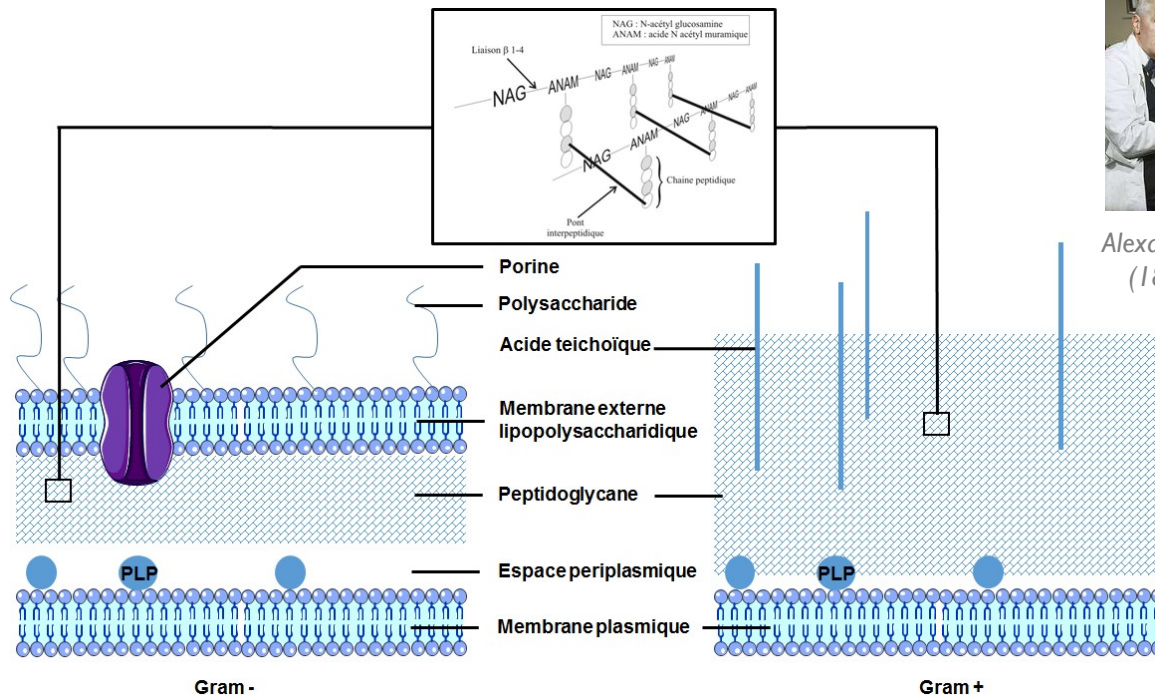
Véritable compartimentation

Espaces et compartiments chez les bactéries

Diversité des Eubactéries (Peycru et al 2010)

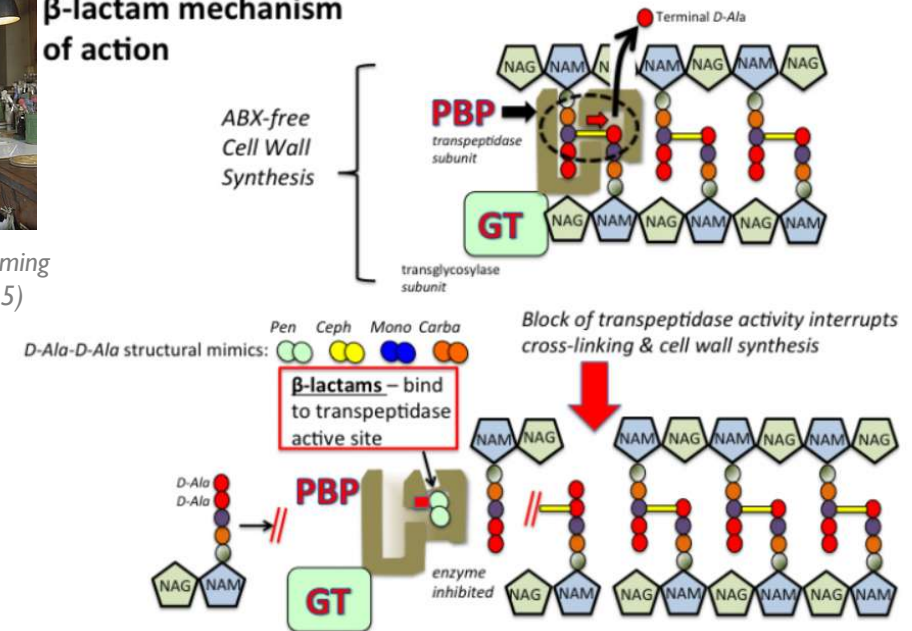
Encart sur la paroi des bactéries

EFFET DE LA PÉNICILLINE, INHIBITEUR IRRÉVERSIBLE DE L'ENZYME DE LA SYNTHÈSE DE LA PAROI BACTÉRIENNE GRAM+



Alexander Fleming
(1881-1955)

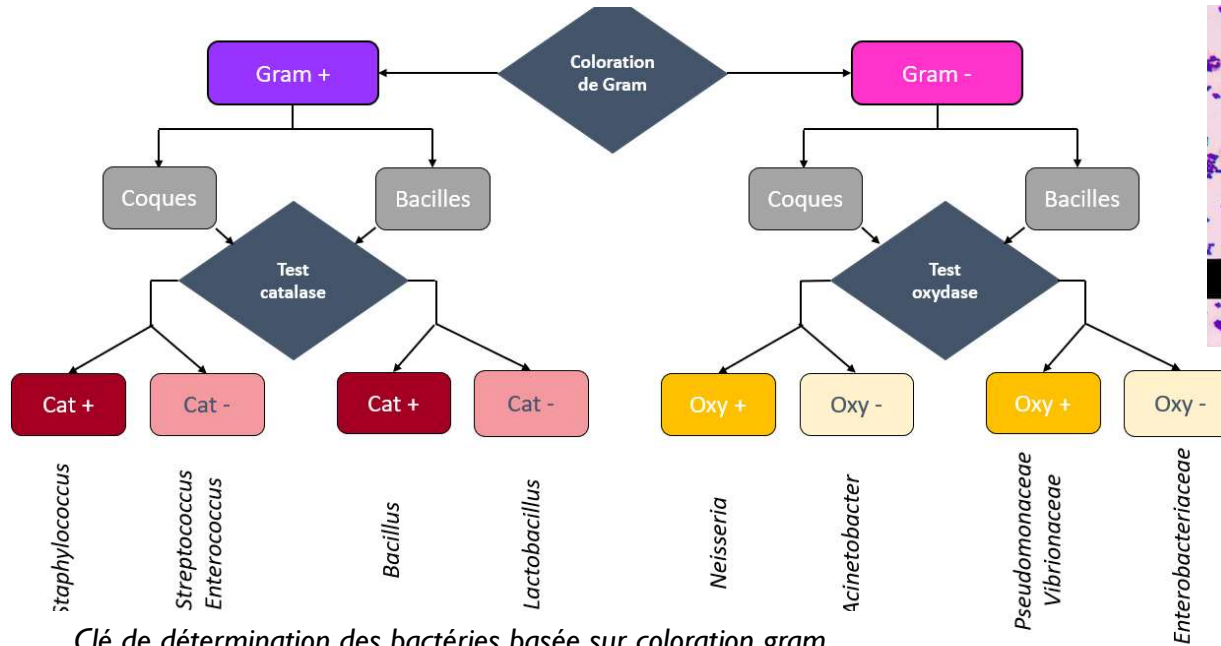
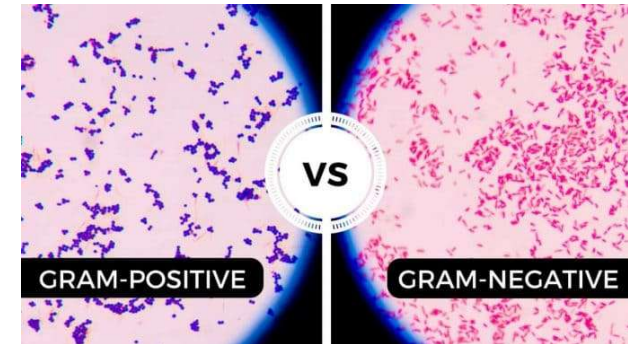
β -lactam mechanism of action



Agencement des chaînes de peptidoglycanes = muréine dans la paroi bactérienne

(source: <https://pharmacomedicale.org/medicaments/par-specialites/item/beta-lactamines-penicillines-cephalosporines>)

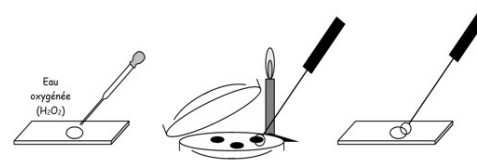
La pénicilline = famille des bêta-lactamines
=> Inhibition de la transpeptidase qui catalyse les liaisons peptidiques entre les peptidoglycanes



Clé de détermination des bactéries basée sur coloration gram suivie d'un test à la catalase

Test à la catalase sur colonies bactériennes

Déposer sur une lame une goutte d'eau oxygénée (= peroxyde d'hydrogène, H_2O_2) à l'aide d'une pipette Pasteur
Prélever une colonie à l'aide de l'anse
Dissocier la colonie dans la goutte à l'aide de l'anse



Bulles d'oxygène

La bactérie possède la catalase, elle est dite :

Catalase +



Pas de bulle

La bactérie ne possède pas la catalase, elle est dite :

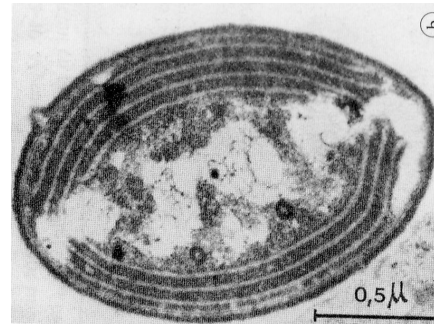
Catalase -



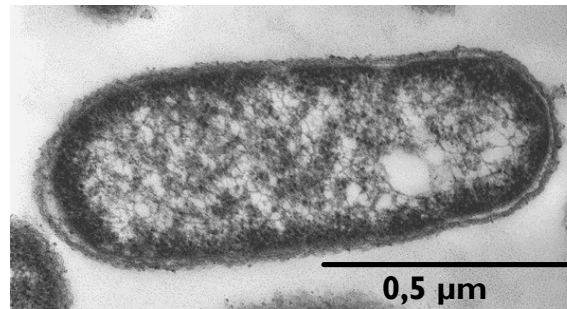
A. LES CELLULES PROCARYOTES : DES CELLULES PEU OU PAS COMPARTIMENTÉES DÉLIMITÉES PAR UNE OU DEUX MEMBRANES

2. Une compartimentation possible associée à une régionalisation du fonctionnement cellulaire

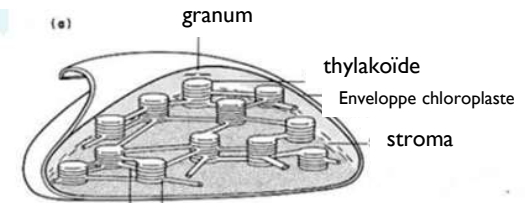
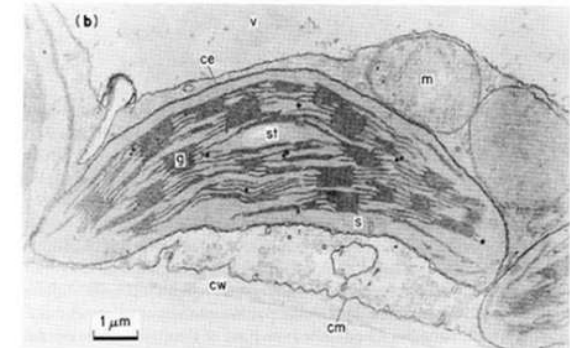
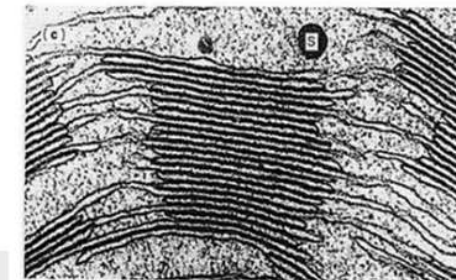
- **replis membranaires** (sacculs) chez certaines **cyanobactéries** (bactéries photosynthétiques phylogénétiquement et structuralement proches des chloroplastes) → organites → **thylakoïdes chloroplastiques**.
- Centre du cytosol: **carboxysomes** → pas organites car non délimités par une membrane mais **capsules protéiques** au sein desquelles se concentrent des enzymes spécialisées dans la fixation du carbone minéral comme l'anhydrase carbonique ou encore la **RubisCO**.



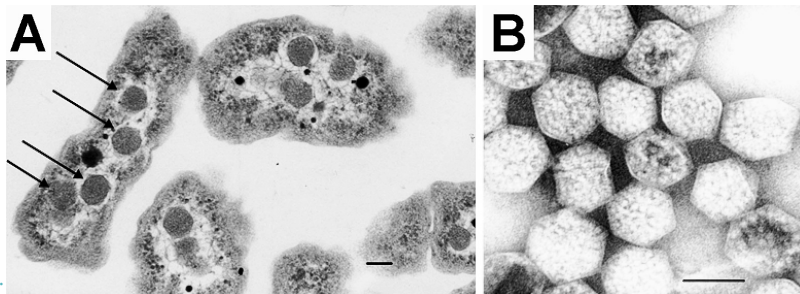
Cyanobactérie



Escherichia coli

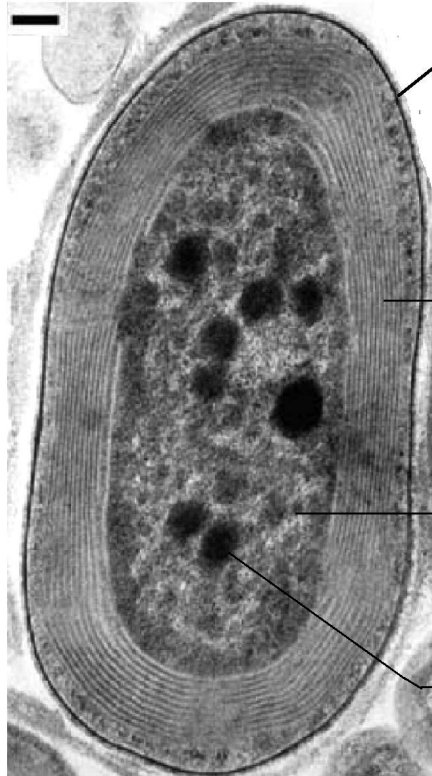


Le chloroplaste d'une cellule eucaryote est pourvu d'empilement de sacs aplatis nommés **thylakoïdes**



[A] Microscopie électronique de cellules de *Halotriobacillus neapolitanus* dont les carboxysomes sont indiqués par des flèches. [B] Vue de carboxysomes intacts isolés d'*H. neapolitanus* ; la barre d'échelle indique une longueur de 100 nm

100nm



Paroi
GRAM.

Membrane
externe
Paroi de
peptidoglycane
Membrane
interne

Thylakoïde
→ Absorption
de l'énergie
lumineuse

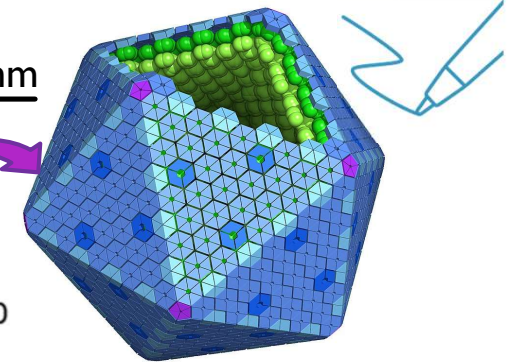
cytoplasme

Carboxysome
Concentration
du CO_2 à
proximité de la
RuBisCo

Ultrastructure d'une cyanobactérie

50 nm

100



Représentation d'un carboxysome montrant les **hexamères protéiques** en bleu (les différentes teintes de bleu indiquent des hexamères de nature et de fonction différentes), les **pentamères** en magenta et les **enzymes encapsulées** en vert.

Chromosome
circulaire
Plasmide

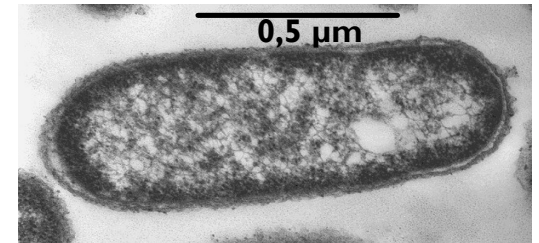
Un **carboxysome** est un micro compartiment bactérien contenant des **enzymes impliquées dans la fixation du carbone**. Ces organites sont formés d'une **coque protéique polyédrique** d'environ 80 à 140 nm de diamètre. On les trouve chez toutes les cyanobactéries et de nombreuses bactéries chimiotrophes qui fixent le CO_2

3. Structure interne des bactéries

- **ribosomes** (qui réalisent la **traduction**) (ribosomes un peu différents de ceux des Eucaryotes)
- **inclusions de nature variée** (glucidique, lipidique...) (ex. présence de glycogène chez les **Cyanobactéries** + parfois **vacuoles gazeuses** ayant un rôle dans la flottaison de l'organisme)
- **Information génétique :**
 - Chromosome bactérien : **long ADN** souvent **circulaire** comprenant l'essentiel du **génome de la bactérie** associé à des protéines.
 - ✓ localisé dans une région du cytoplasme nommée **nucléoïde**.
 - ✓ Associé à des protéines (NAP nucleoid associated proteins)
 - ✓ *In vivo*, l'ensemble {ADN + protéines} forme le **nucléoïde**, fixé au **mésosome**
 - Les **plasmides** : **unités génétiques de petite taille (quelques centaines de pb)**, souvent présentes (mais pas systématiquement), IG facultative

Nucléoïde : n.m. région du cytoplasme bactérien où se situe le chromosome bactérien (80%), associé à des protéines (20%).

Mésosome : n.m. invagination membranaire avec site de fixation du chromosome bactérien



Escherichia coli (Gram -)

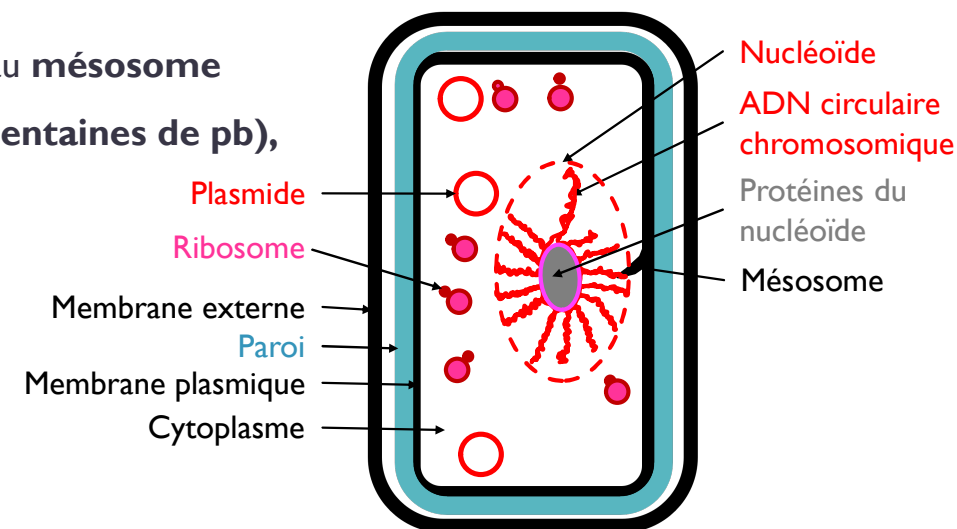
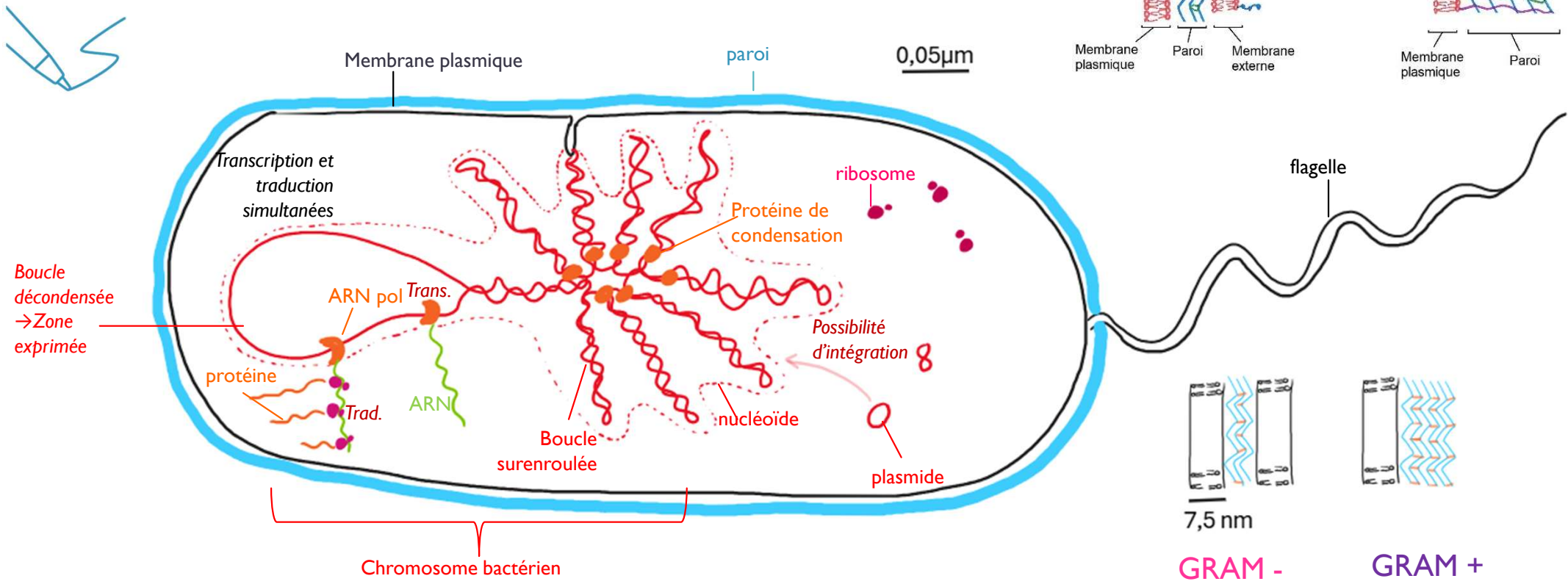


Schéma de l'organisation d'*E. coli*



Organisation des cellules bactériennes

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique

- Etude des compartiments:
 - ⇒ comment les observer? → ultrastructure
 - ⇒ Comment les isoler?
- Compartiments → délimitation par une ou plusieurs membranes
- Nature des membranes
- Compartiments → fonctions?



Citer des compartiments intra-cellulaires, leur taille, leur structure et leur fonction

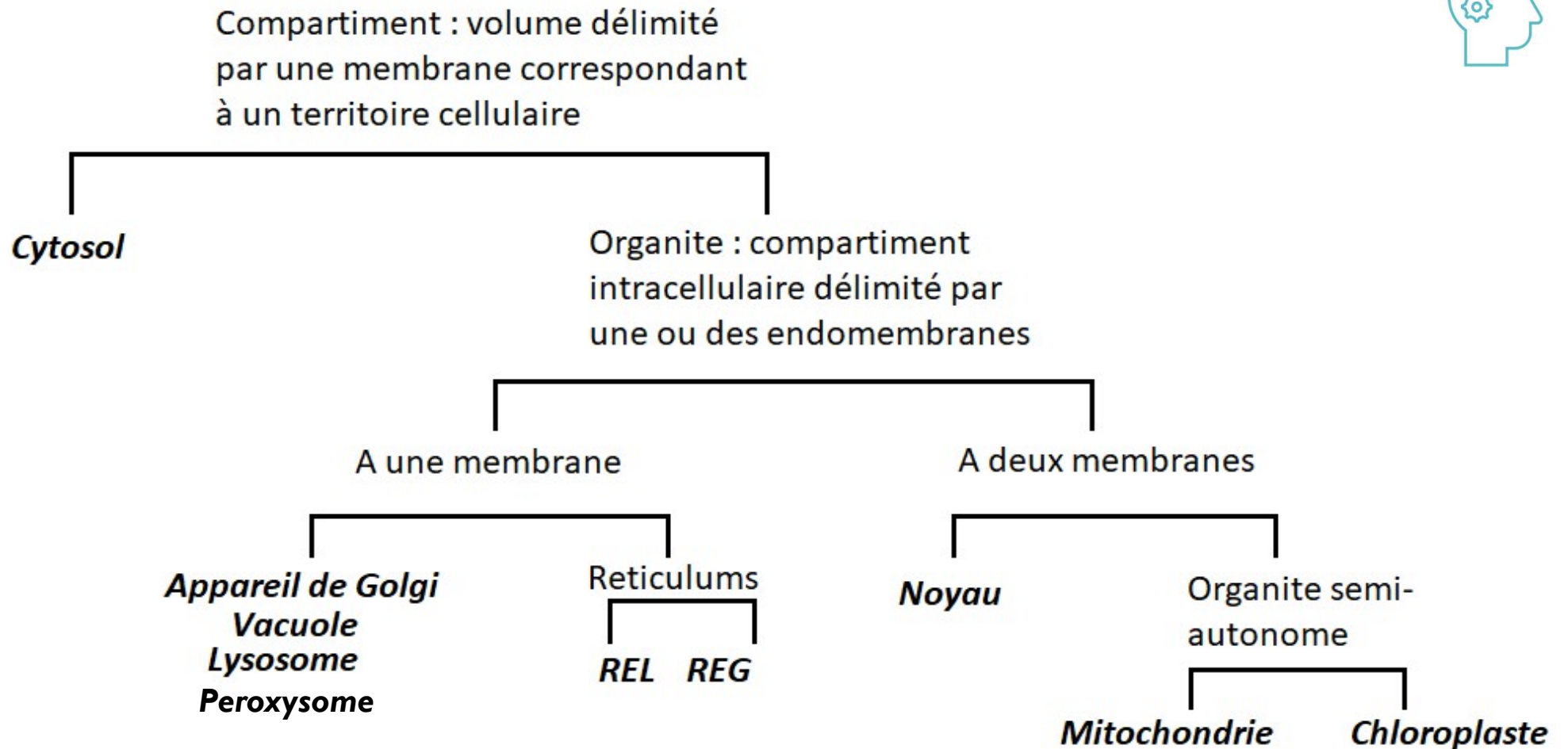
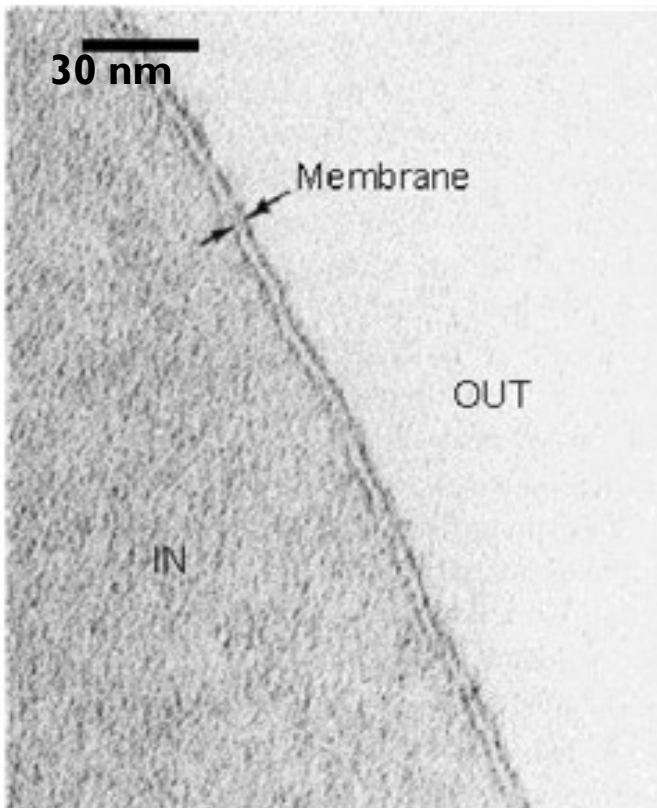


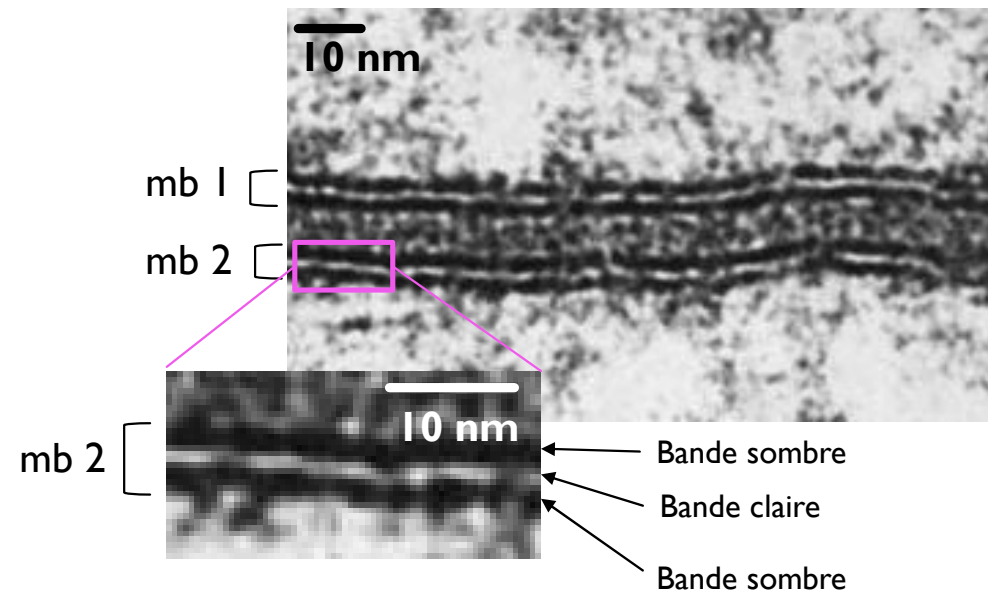
Figure 8 : un essai de classification des principaux compartiments cellulaires des cellules eucaryotes

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

Observation au MET



Membrane d'un ovocyte de souris (MET)



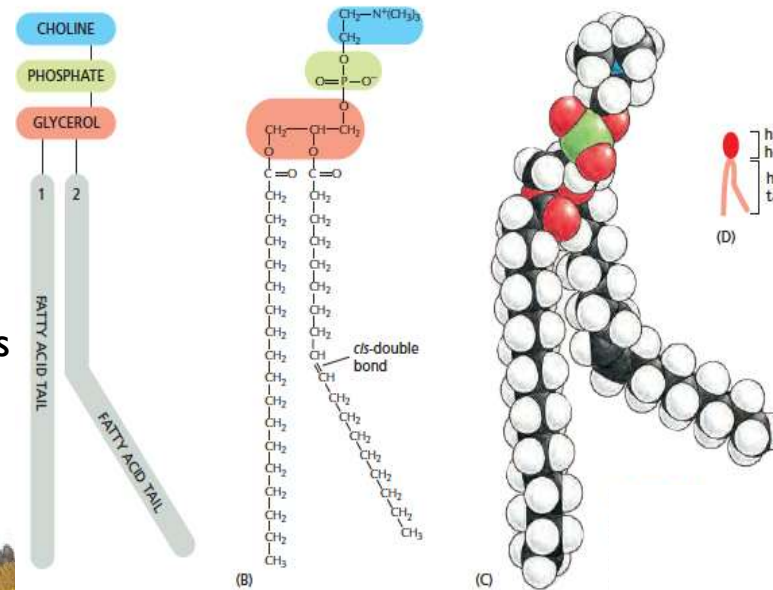
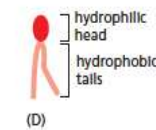
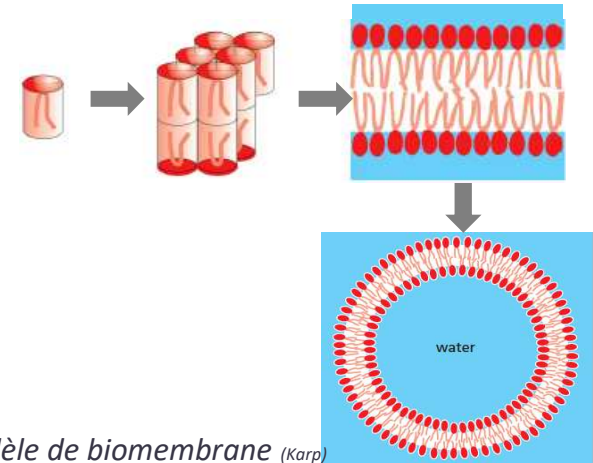
Les membranes de deux cellules adjacentes (MET)

- La membrane plasmique mesure en moy **7,5 nm** d'épaisseur (5-8 nm)
- Elle apparaît **tripartite** au MET

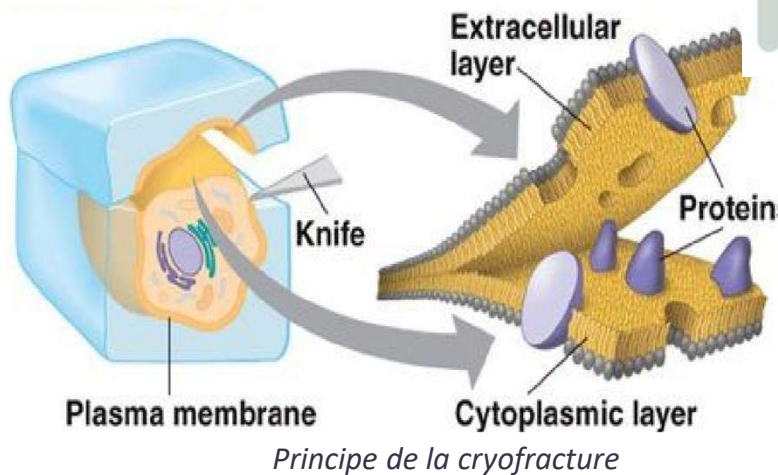
La membrane plasmique

**Cf. cours
membrane**

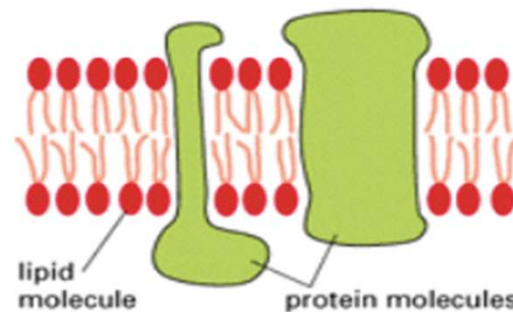
- La membrane plasmique est une **bicouche lipidique** associée à des protéines



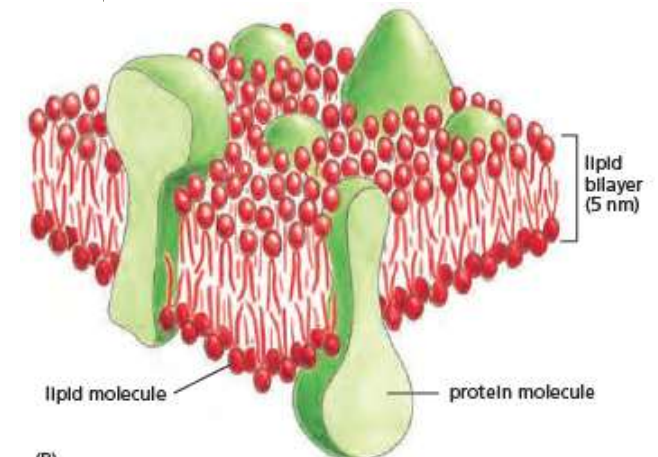
Modèle de biomembrane (Karp)



Principe de la cryofracture



Assemblage de lipides en bicouche lipidique (Alberts)



B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

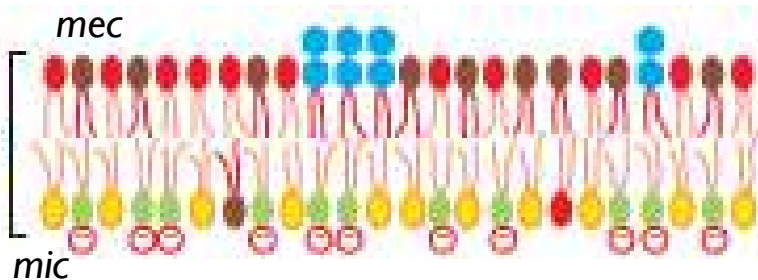
La membrane plasmique

Propriétés

Cf. cours
membrane

- Une membrane possède un cœur **hydrophobe** mais des surfaces hydrophiles entourées d'un environnement hydrophile
- La membrane est une surface **fluide**, capable de :
 - fusionner avec d'autres membranes
 - se scinder pour donner des vésicules
- La membrane est **asymétrique**

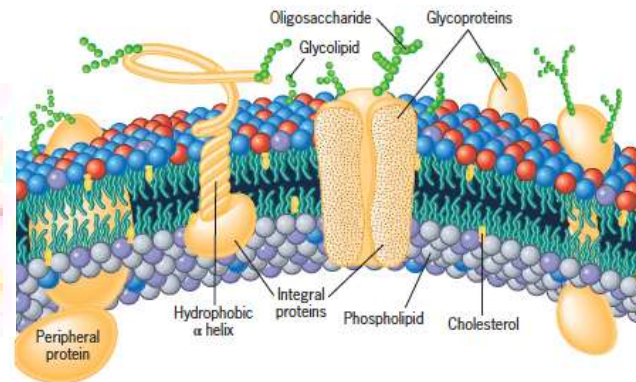
Bicouche lipidique



Légende : **Phosphatidyléthanolamine**,
Phosphatidylsérine, **Phosphatidylcholine**,
Sphingomyéline

Distribution asymétrique des lipides

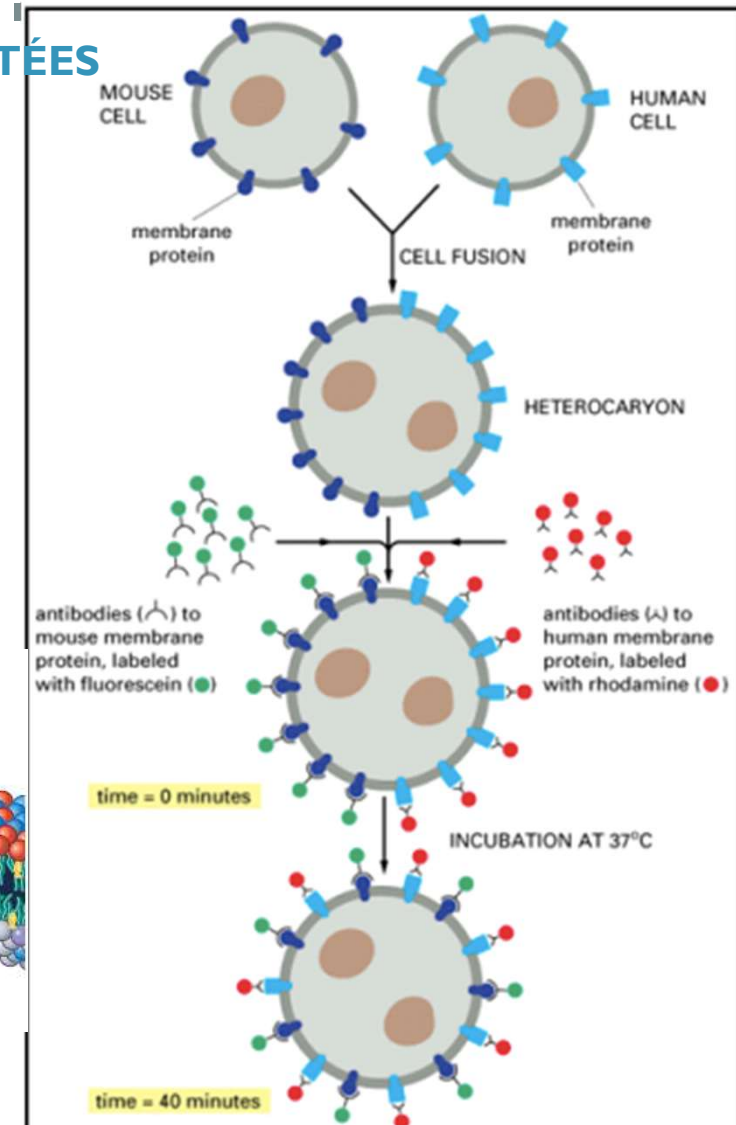
BCPST I - ENCPB - S. DALAINE



Distribution asymétrique des glucides

Cf. cours
membrane

Preuve expérimentale de la fluidité
membranaire (Alberts)



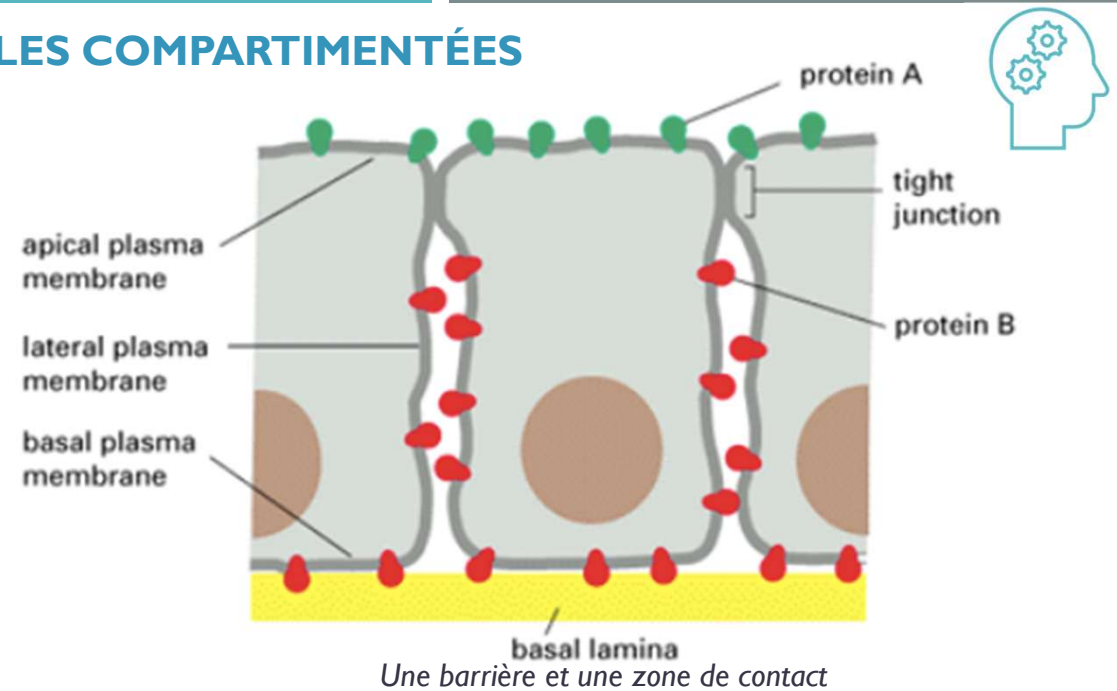
B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

La membrane plasmique

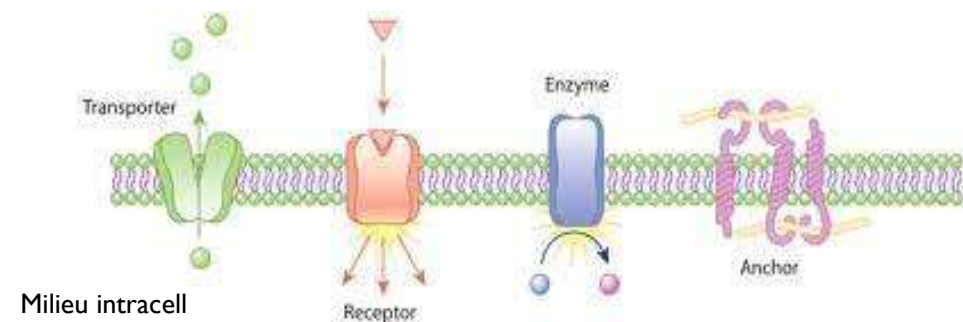
Fonctions

Cf. cours
membrane

- Nature lipidique au sein d'un milieu aqueux $\Rightarrow$ membrane = **barrière**
- Cependant grâce **aux protéines membranaires** $\Rightarrow$ membrane =
 - Une **surface d'échanges**
 - Une structure apte à recevoir et à transmettre à la cellule des **messages** exogènes, nerveux et ou hormonaux
 - Une surface de **contact** intercellulaire et **d'adhésion**



Milieu extracell



Une zone d'échanges et de communication

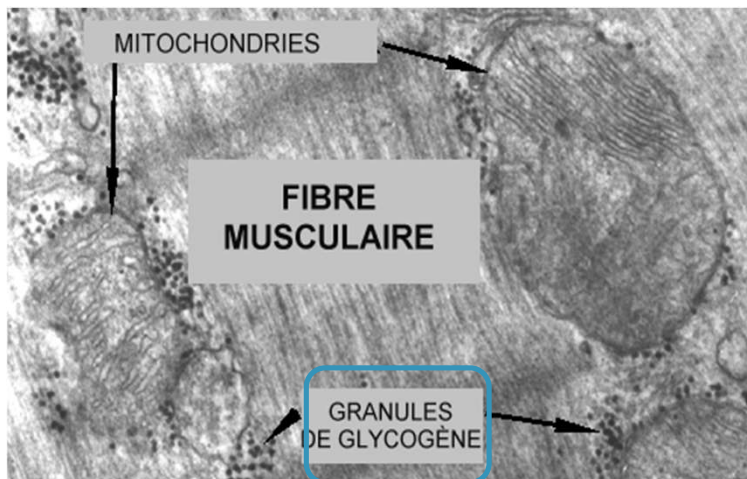
B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES



Cytosol et Hyaloplasme

Composition du hyaloplasme

- Petites molécules : ions, gaz dissous (O_2 , CO_2)
- Molécules moyennes : oses, acides aminés, nucléotides, lipides
- **Macromolécules** : protéines, polyholosides, acides nucléiques
- Des structures **granulaires** : particules de glycogène, globules lipidiques, polyribosomes libres
- Des structures **fibrillaires** : les protéines du cytosquelette



Ion	Cytosol	Sang
K^+	139	4
Na^+	12	145
Cl^-	4	116
HCO_3^-	12	29
A. (protéines)	138	9
Mg^{2+}	0,8	1,5
Ca^{2+}	<0,0002	1,8

Composition ionique du cytosol des Mammifères en mM

Cellule musculaire eucaryote en MET (www.gch.ulaval.ca)

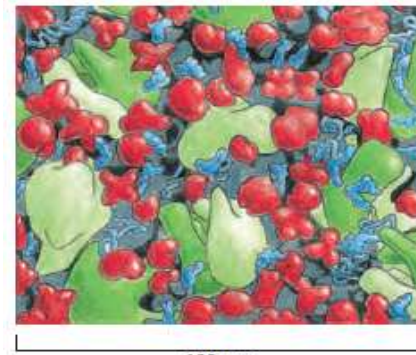


B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

Cytosol et Hyaloplasme

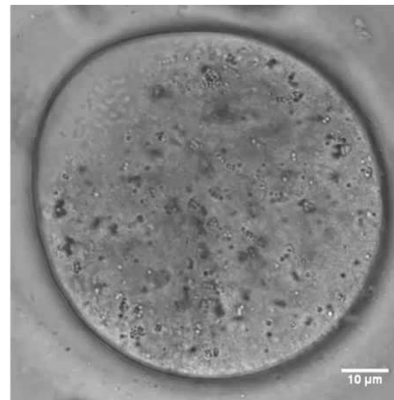
Propriétés du hyaloplasme :

- C'est le compartiment le **plus volumineux** de la cellule : >50% du volume cell.
- Étant très riche en protéines, il est dense et **visqueux** : alternance rapide entre une consistance « **gel** » et une consistance « **sol** » (solution)
- Le changement de viscosité entraîne des **mouvements** internes (**cyclose** + déplacement le long du cytosquelette)



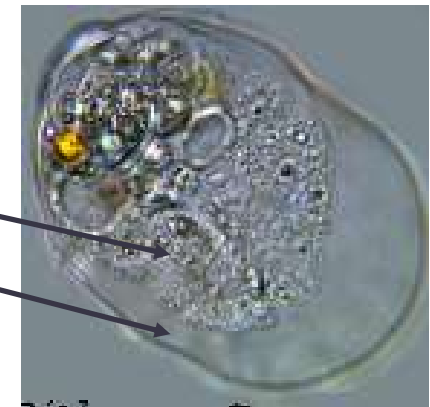
Structure du hyaloplasme

ARN
Ribosomes
Protéines



Cyclose dans
l'ovocyte de souris

<https://rsscience.com/what-is-cytoplasmic-streaming/>



Deux types de hyaloplasme
chez l'amibe (MO)



B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

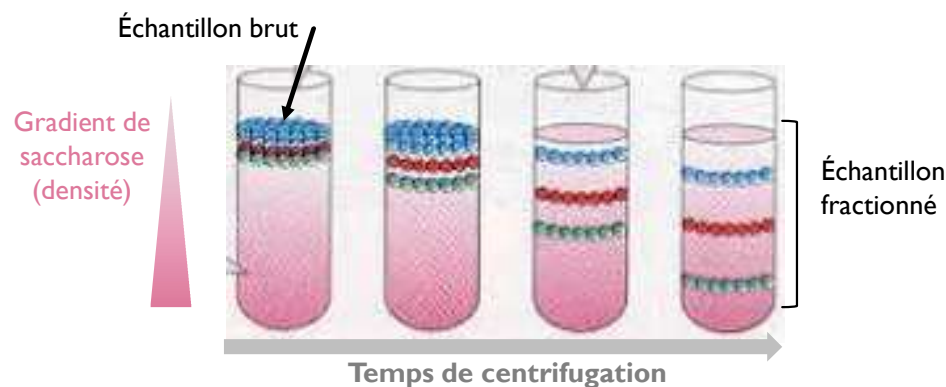
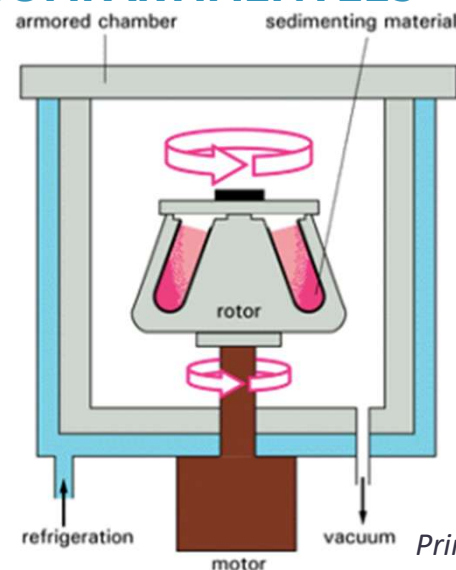
MISE EN ÉVIDENCE DES DIFFÉRENTS ORGANITES CYTOPLASMIQUES

Par ultracentrifugation différentielle

Objectif : séparer les différents constituants cellulaires pour pouvoir les étudier isolément

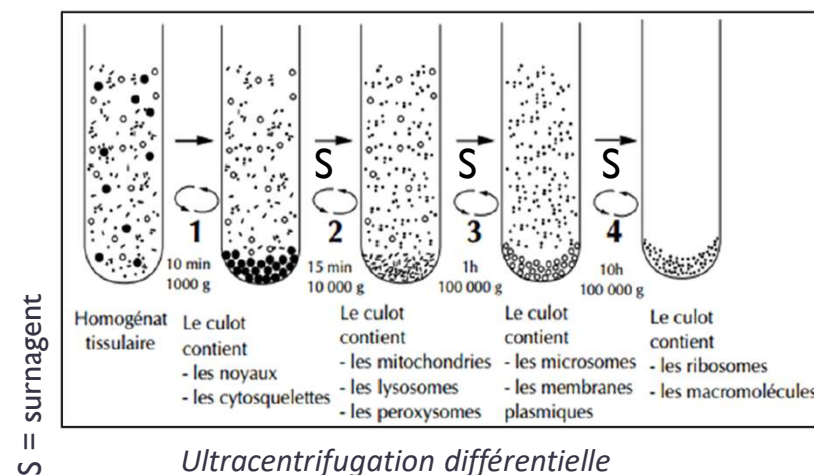
Principe : l'échantillon (fluide) est soumis à des centrifugations successives d'intensité croissante ou à une seule centrifugation sur gradient de saccharose ou de CsCl

→ les constituants cellulaires sont progressivement **séparés** les uns des autres en fonction de leur **densité** et de leur taille

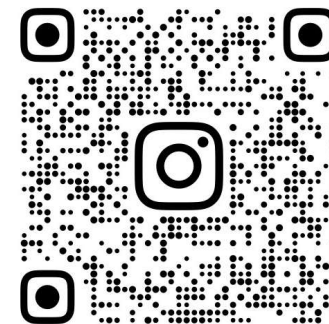


L'échantillon est soumis à un mouvement de rotation très rapide. Cela génère une force centrifuge qui va faire décanter progressivement les constituants de l'échantillon, en fonction de leur densité et de leur taille

Principe de la centrifugation (Cell, Alberts, ed 1994)



Ultracentrifugation différentielle

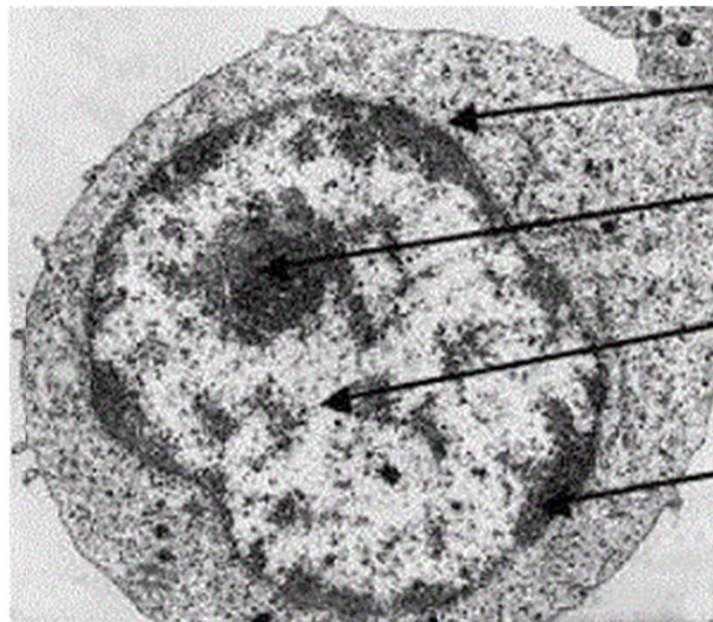


PUBLICATION PARTAGÉE LE 29 JUILLET 2023
PAR ALTA.CIENCIA

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES



I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique



Enveloppe nucléaire

Nucléole

Euchromatine

Hétérochromatine

Electronographie d'une cellule animale montrant l'hétérochromatine, l'euchromatine et le nucléole

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES



I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique

- Noyau délimité par une double membrane: **l'enveloppe nucléaire**
- Mise en évidence par **cryofracture** et **cryodécapage**
- Visualisation de **pores nucléaires**
 - ✓ $\varnothing$ ext: 150 nm
 - ✓ $\varnothing$ int: 45 nm

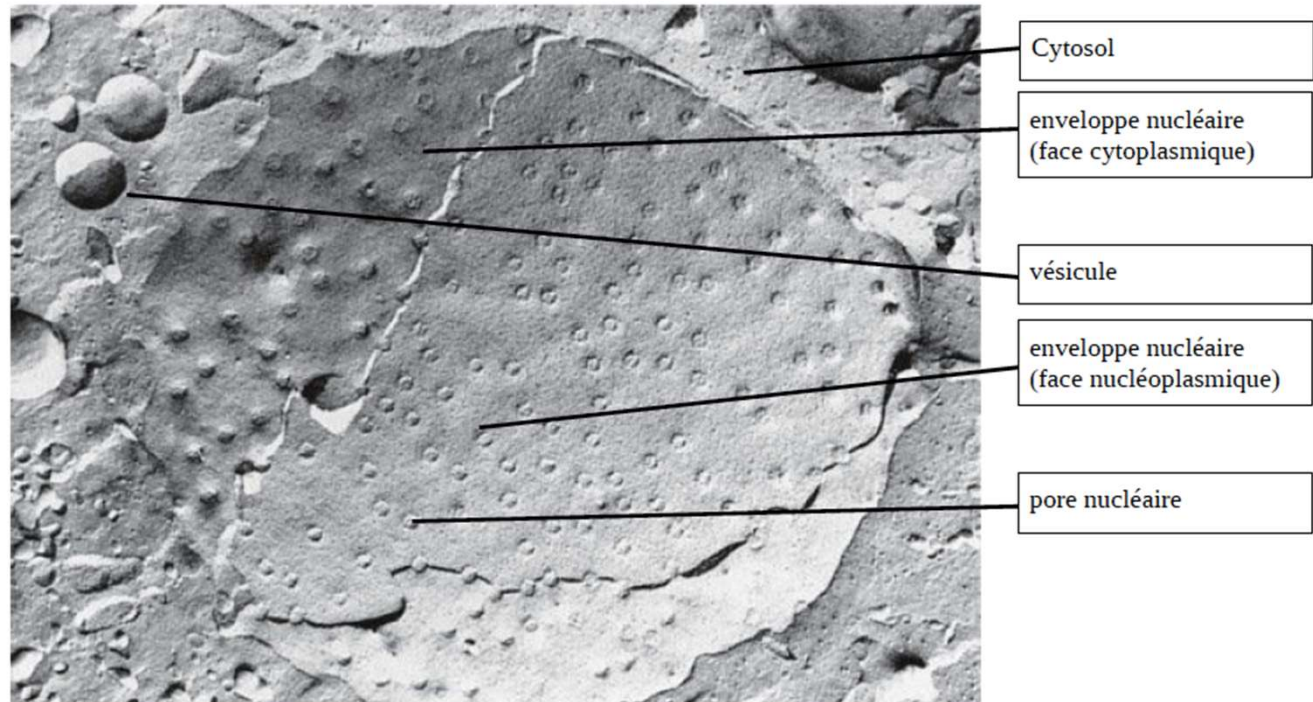
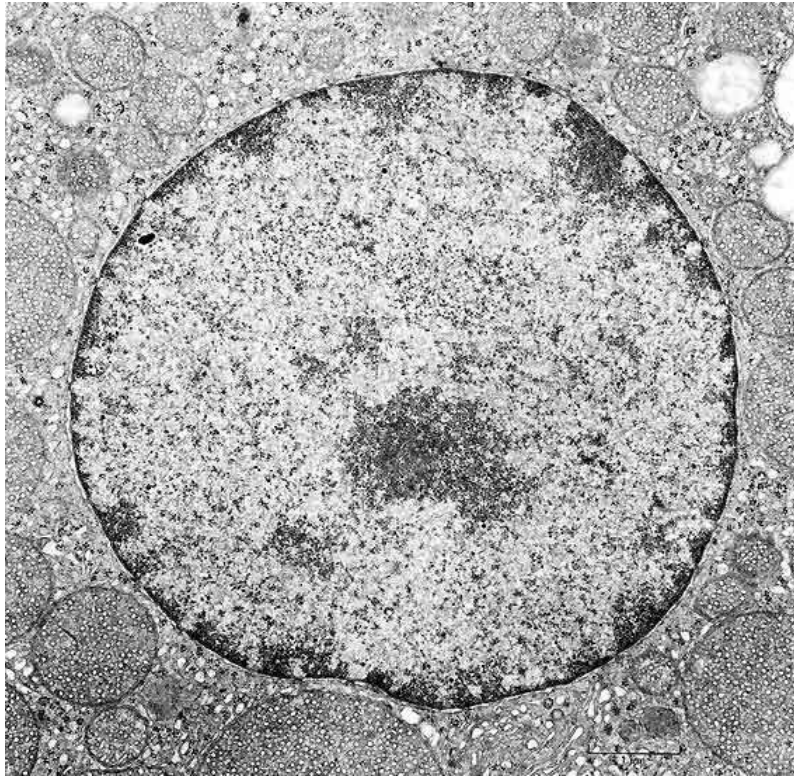


Image obtenue au MEB d'une enveloppe nucléaire de cellules musculaires de rat. x 200 000

Noyau (MET puis cryofracture)

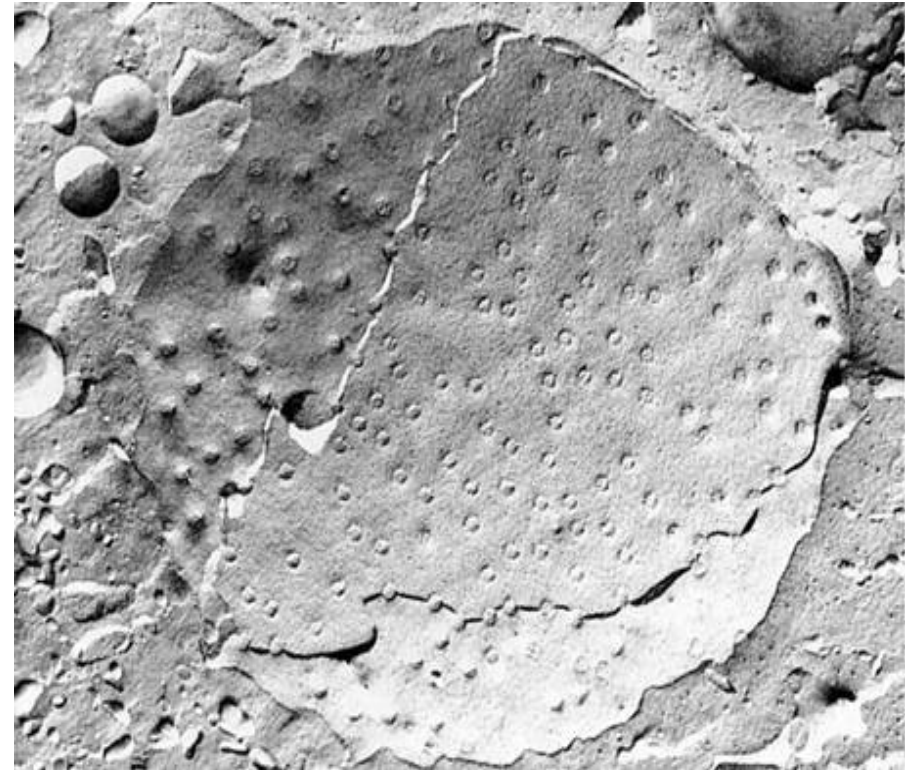


Electronographie MET → raisonner sur les zones denses aux électrons

Zone dense aux électrons, circulaire → enveloppe = double membrane

Zone centrale dense aux e⁻ → nucléole

Zones éparse dense aux e⁻ → hétérochromatine



Electronographie MEB → raisonner sur contrastes, les reliefs

Présence de deux membranes accolées → enveloppe

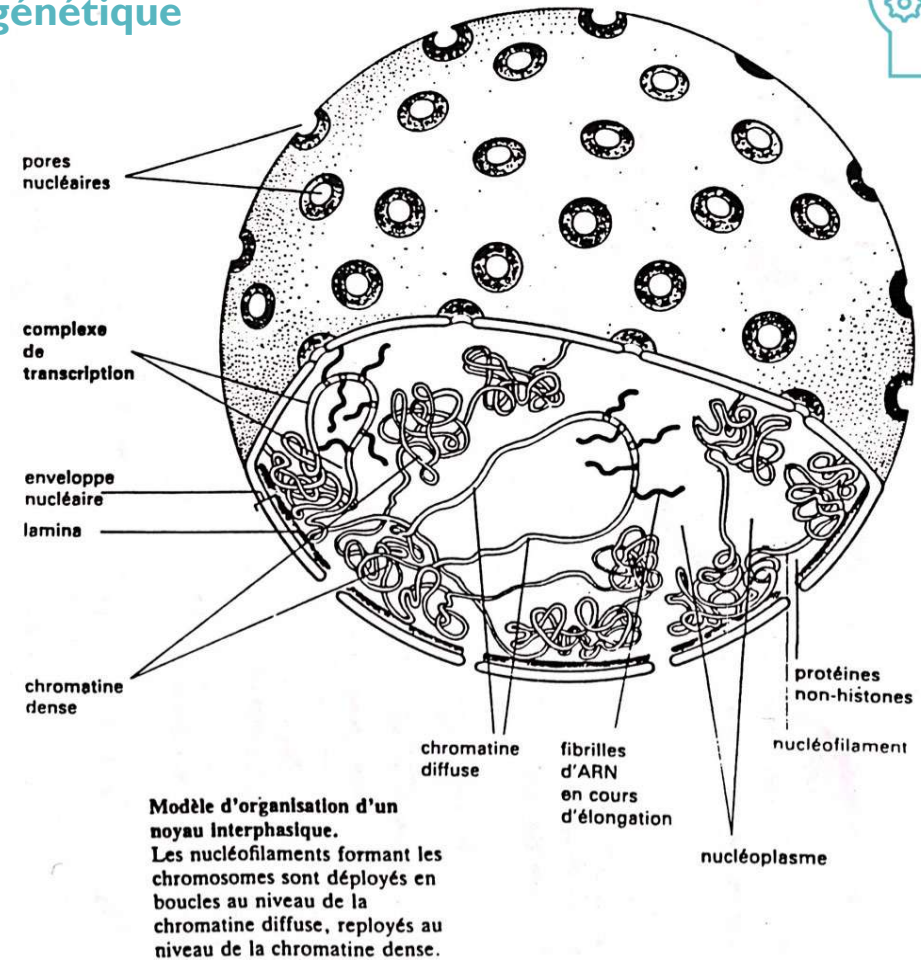
Nbreuses structures creuses traversant l'enveloppe → pores nucléaires constitués de complexes protéiques

Ombrage en haut à gauche → cryodécapage après cryofracture

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique

- Noyau = lieu de **stockage et d'expression de l'information génétique**
- ADN = support de l'IG associé à des protéines structurales (**histones**) → degré de compaction +/- grand
 - **Euchromatine** (clair au MET), + **hétérochromatine** (sombre au MET)
 - **Structure // fonction: degré de compaction lié au degré d'expression**
- **Nucléoles** = zones de synthèse de certains **ARN ribosomiques**.
- **enveloppe nucléaire** percée de nombreux **pores**
 - sortie d'ARN issus de la transcription
 - entrée de facteurs de transcription...



Modèle du noyau interphasique

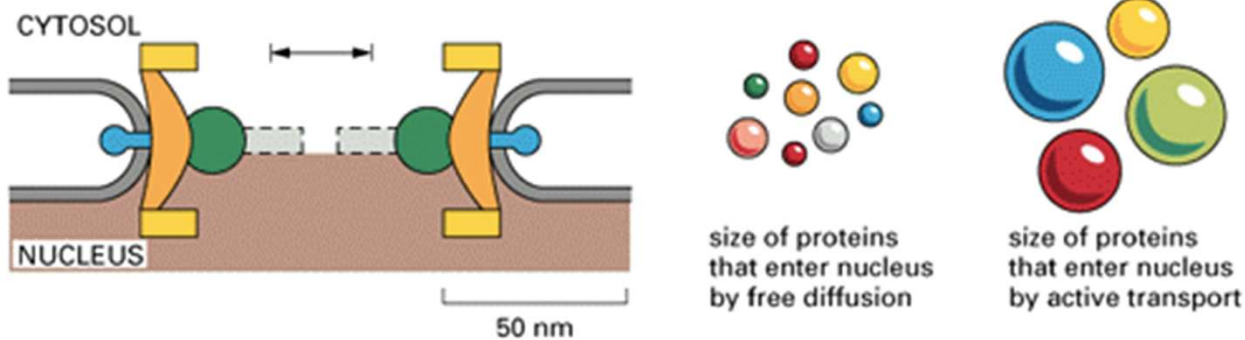
B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique

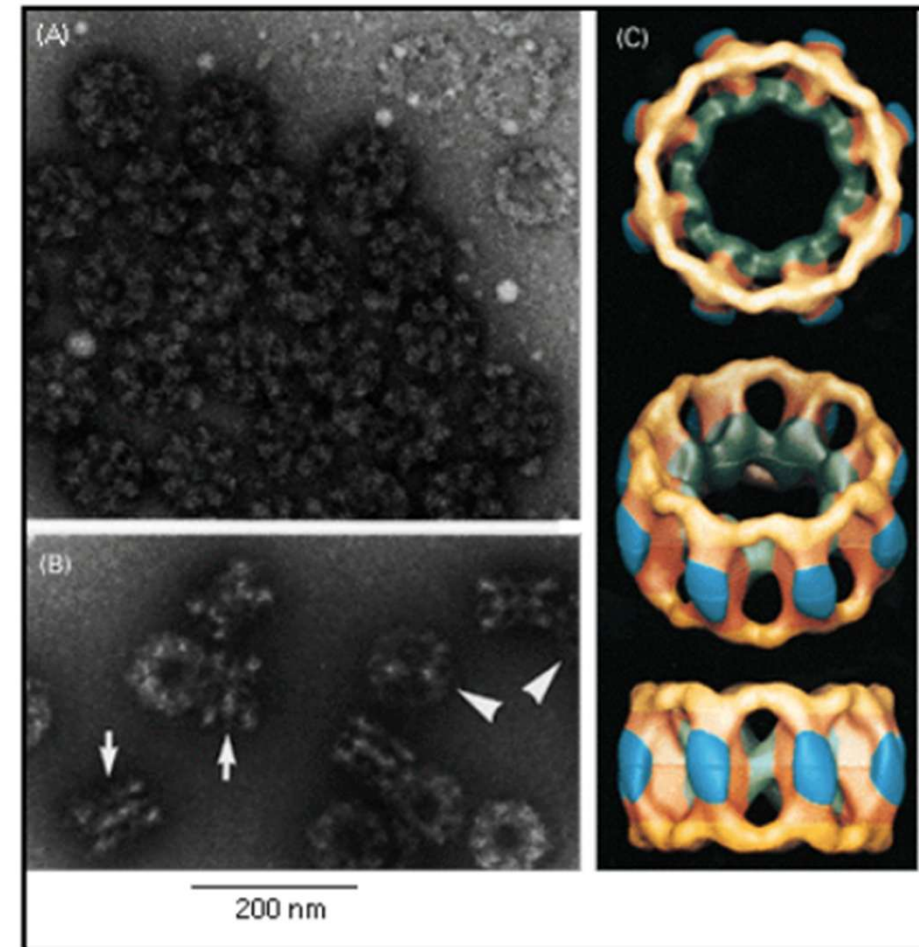
LES PORES NUCLÉAIRES

MET et reconstitution assistée par ordinateur des complexes des pores nucléaires :

(A) Et (B) pores nucléaires libérés par action de détergent,
(C) reconstitution des pores en 3D



- Diffusion des protéines (ex: facteurs de transcription) au travers des pores nucléaires
 - Petites protéines → diffusion simple
 - Grosses protéines → diffusion facilitée

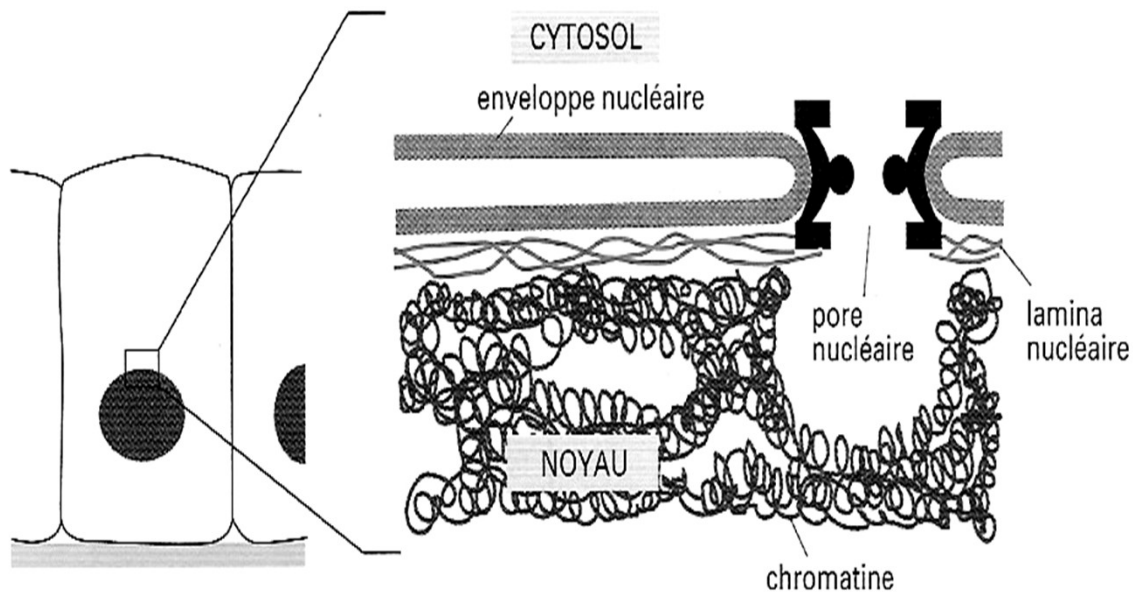


Source: Cell, Alberts, ed 1994; p. 1043

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

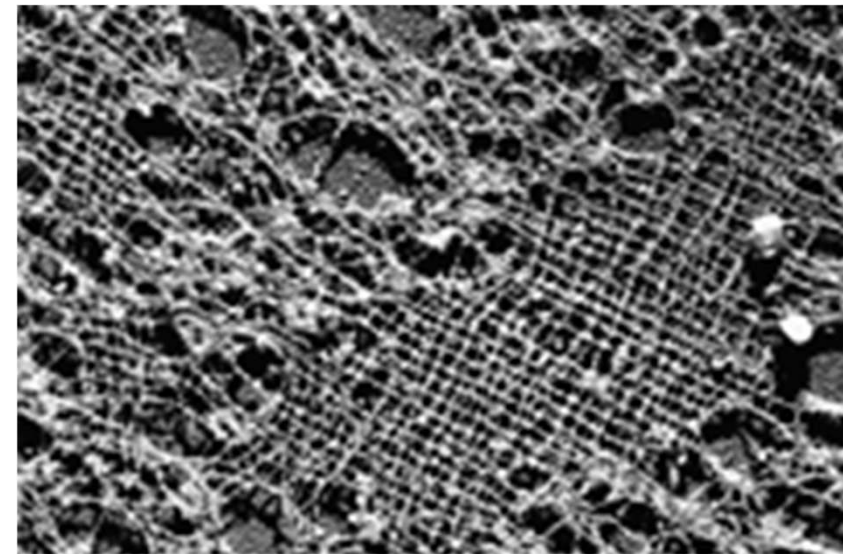


I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique



La lamina est un treillis de filaments de lamines, protéines du cytosquelette (filament intermédiaire).

LES LAMINES SONT DES PROTÉINES STRUCTURALES (FILAMENTS INTERMÉDIAIRES) FORMANT LA LAMINA

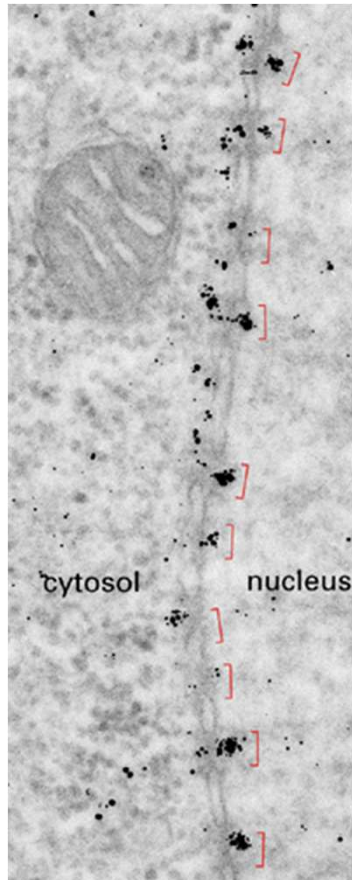


1 μm

*Une enveloppe tapissée de **lamina interne***

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique



Source: Cell, Alberts, ed 1994; p. 1046

MISE EN ÉVIDENCE D'UN FLUX DE MATIÈRE À TRAVERS LES PORES NUCLÉAIRES

Import de protéines par les pores nucléaires, par marquage de **protéines marquées à l'or**, de diamètre supérieur au pore nucléaire « fermé » (9 nm)

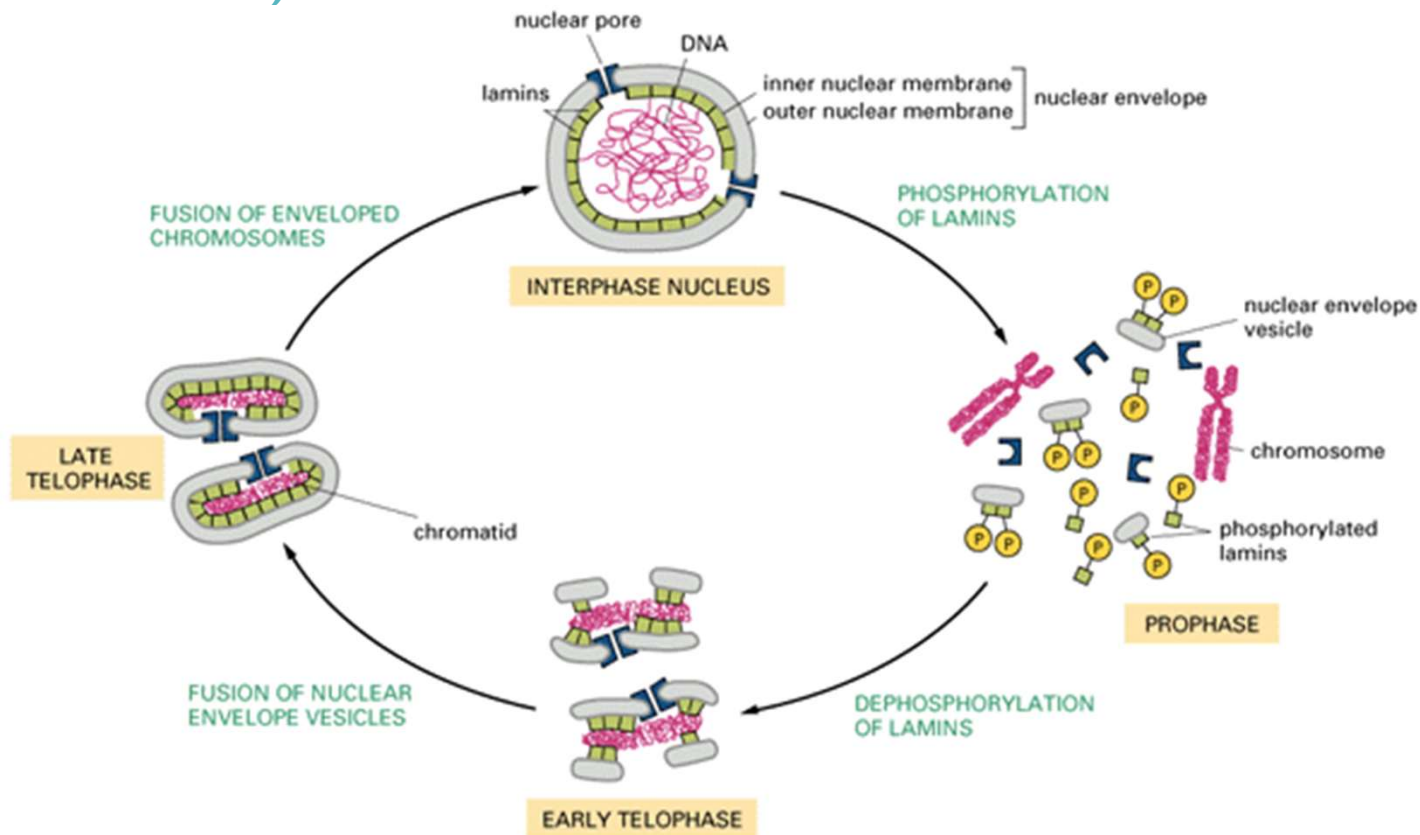
➔ Les pores nucléaires ont été agrandis pour permettre le passage de ces protéines

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

36

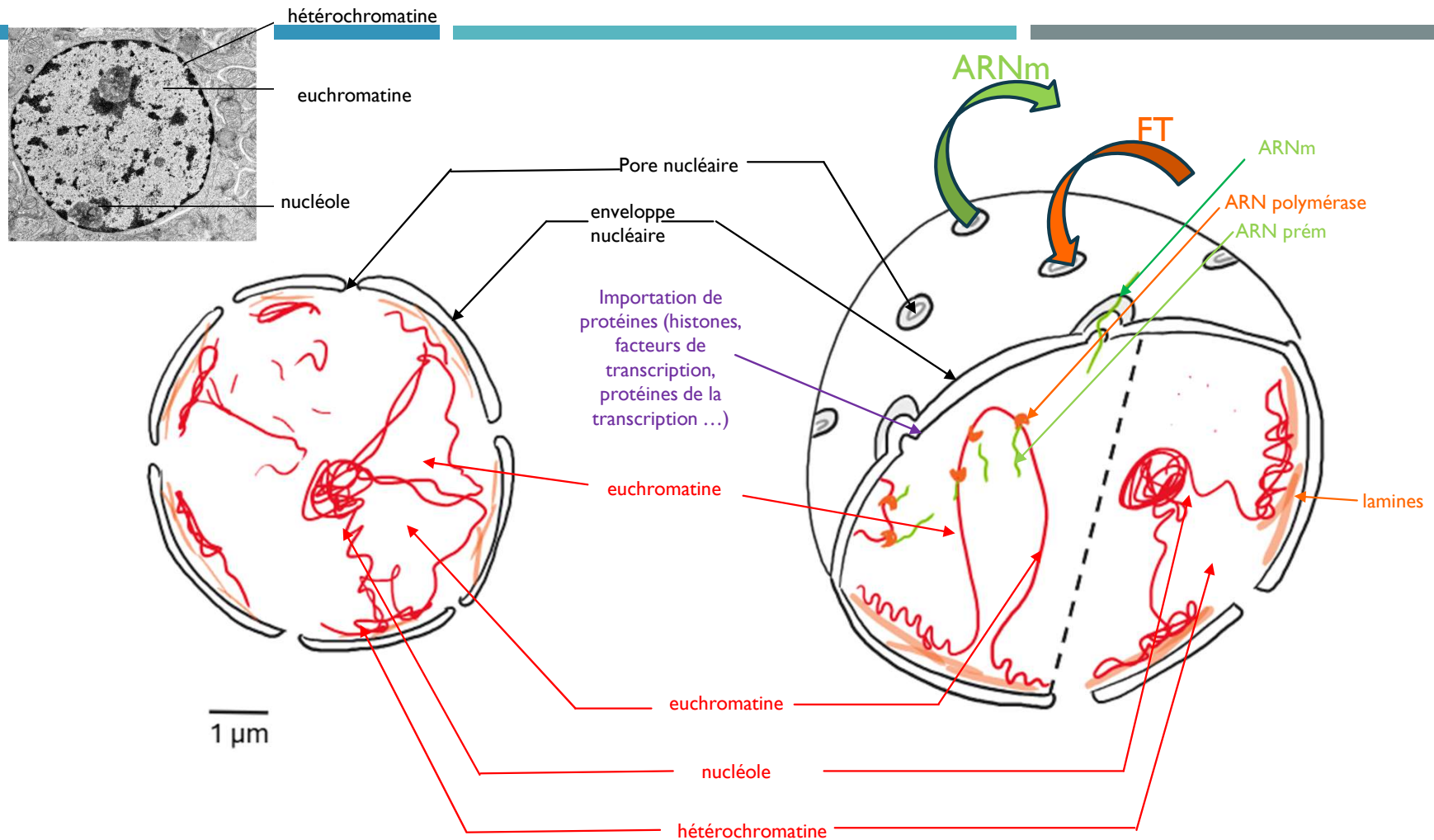
I. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique

L'ENVELOPPE NUCLÉAIRE ÉVOLUE AU COURS D'UN CYCLE CELLULAIRE (INTERPHASE, MITOSE)



- Décomposition et reformation de l'enveloppe nucléaire au cours de la mitose
- Rôle de la **phosphorylation des lamines nucléaires** dans la désagrégation de l'enveloppe nucléaire
- Déphosphorylation des lamines lors de la reformation de l'enveloppe

Source: Cell, Alberts, ed 1994; p. 1048



Organisation fonctionnelle du noyau interphasique



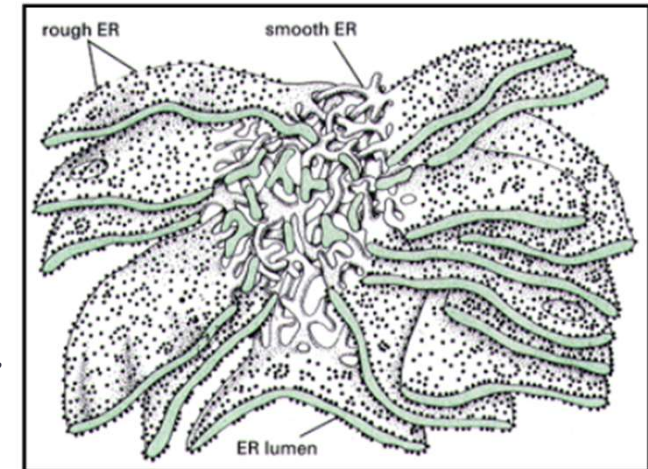
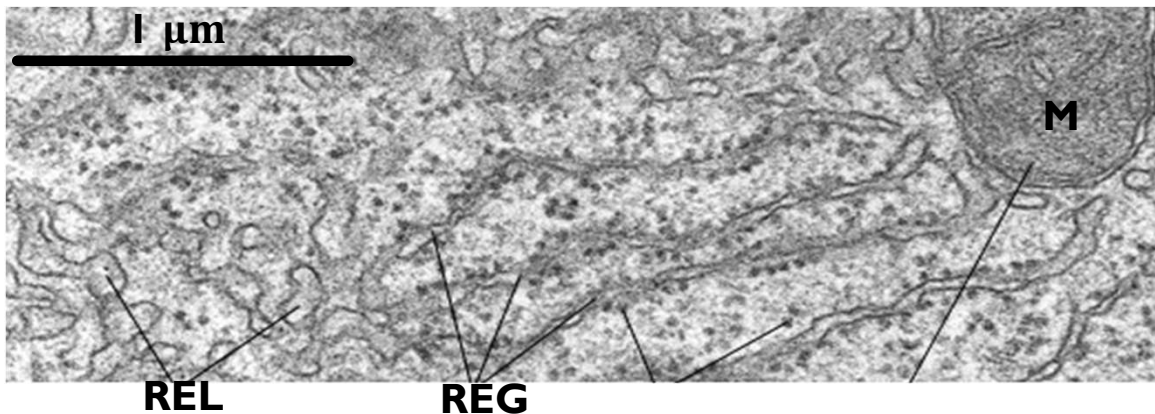
B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

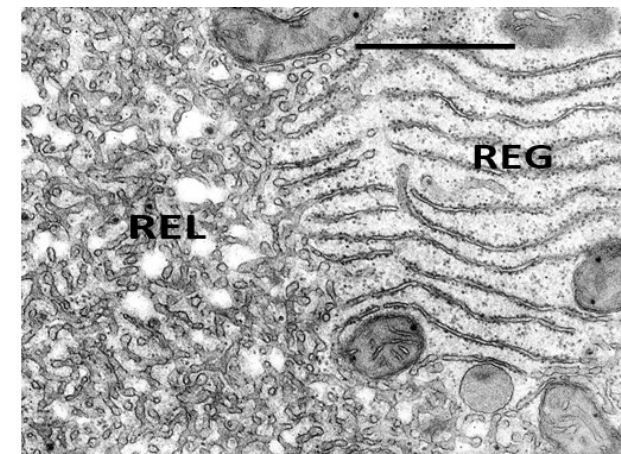
2.1. Les réticulums endoplasmiques

- **Réticulum endoplasmique (RE)** : réseaux de feuilletts aplatis, sacs et tunnels membranaires s'étendant partout dans le cytoplasme des cellules eucaryotes.
- On en distingue 2 types :
 - Le RE granuleux (**REG**) ou rugueux (**RER**), recouvert de ribosomes
 - Le RE lisse (**REL**), sans ribosomes

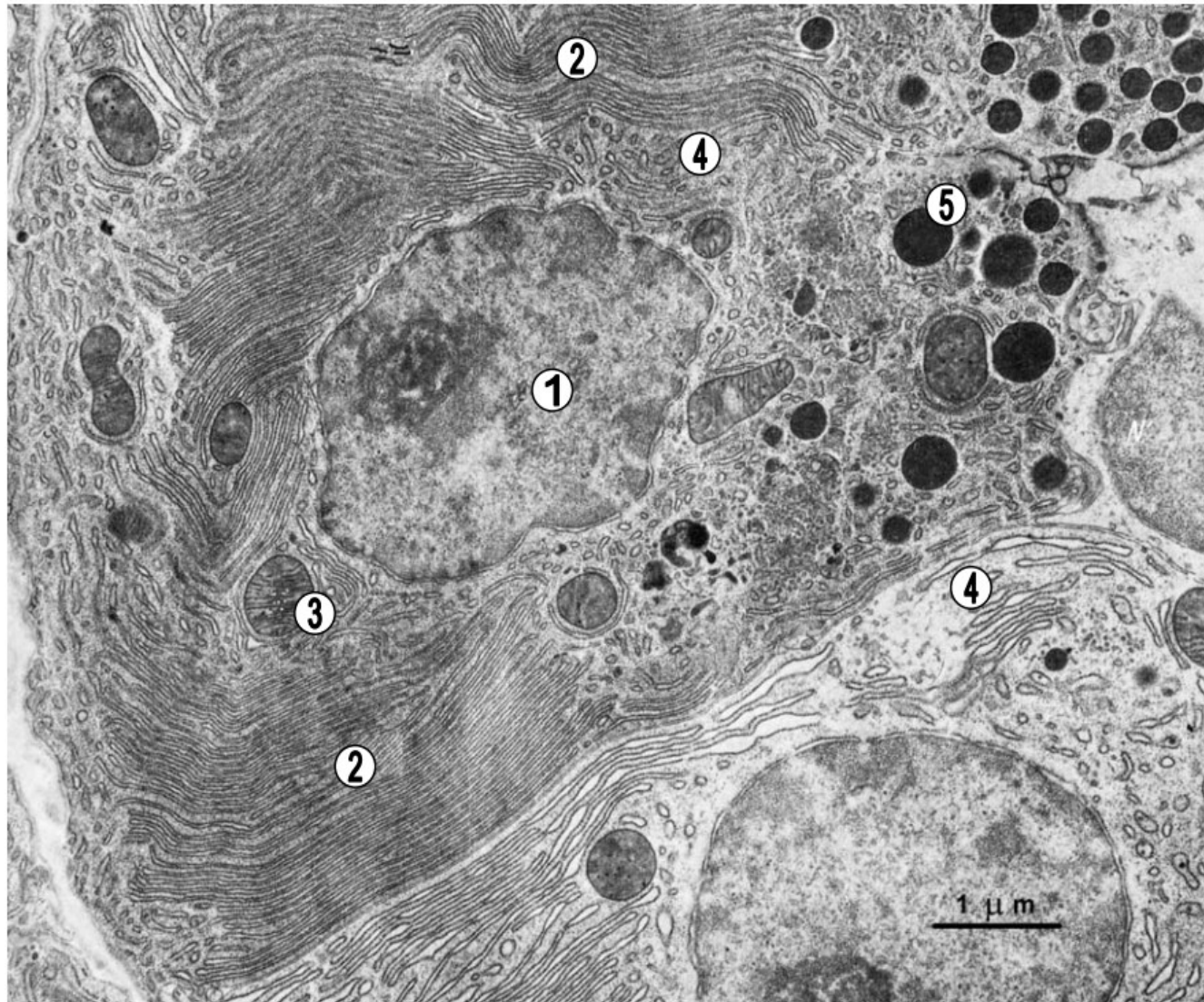
Le RE,
un **réseau**
anastomosé



Les deux types de RE d'une cellule de mammifère (MET) (Alberts, ed 1994, p.49)
BCPST 1 - ENCPB - S. DALAINE



Les deux types de RE (MET)

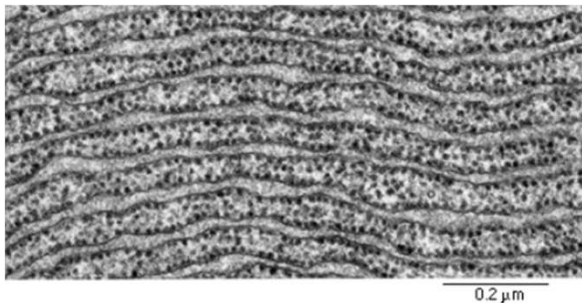
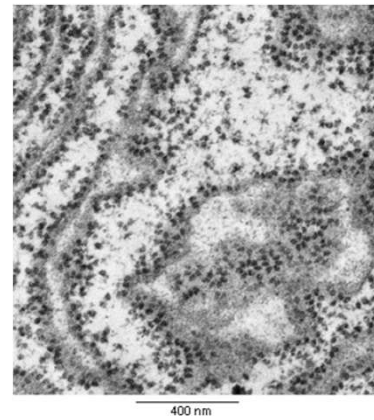
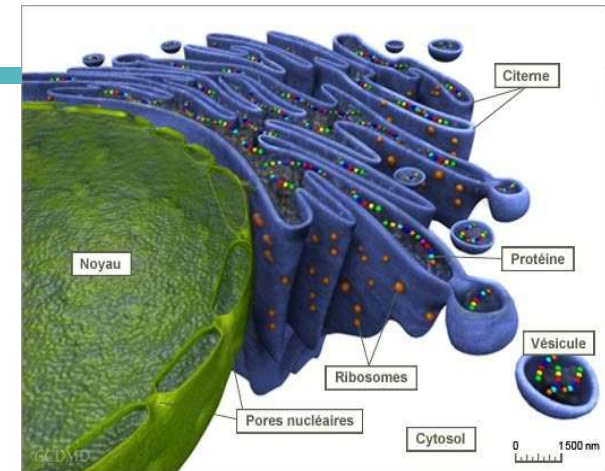


B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

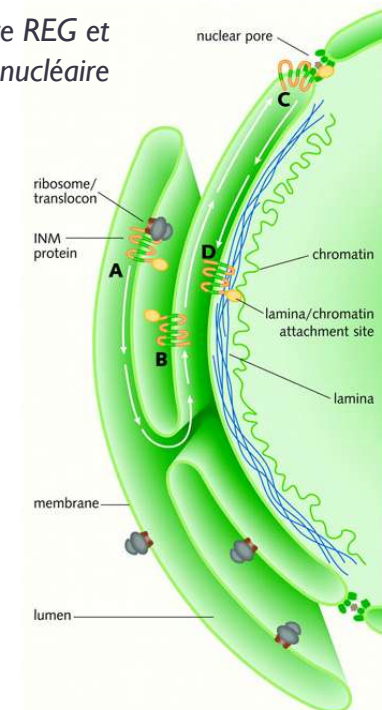
2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

2.1. Les réticulums endoplasmiques

- **REG** : saccules aplatis empilés et interconnectés qui délimitent un espace de 20-30 nm de haut.
- Mb du REG en continuité avec mb externe de l'enveloppe nucléaire.
- Recouvert de **ribosomes**.
 - spécialisé dans la **synthèse** (traduction) et le **transport** de **protéines membranaires** ou **sécrétées**.



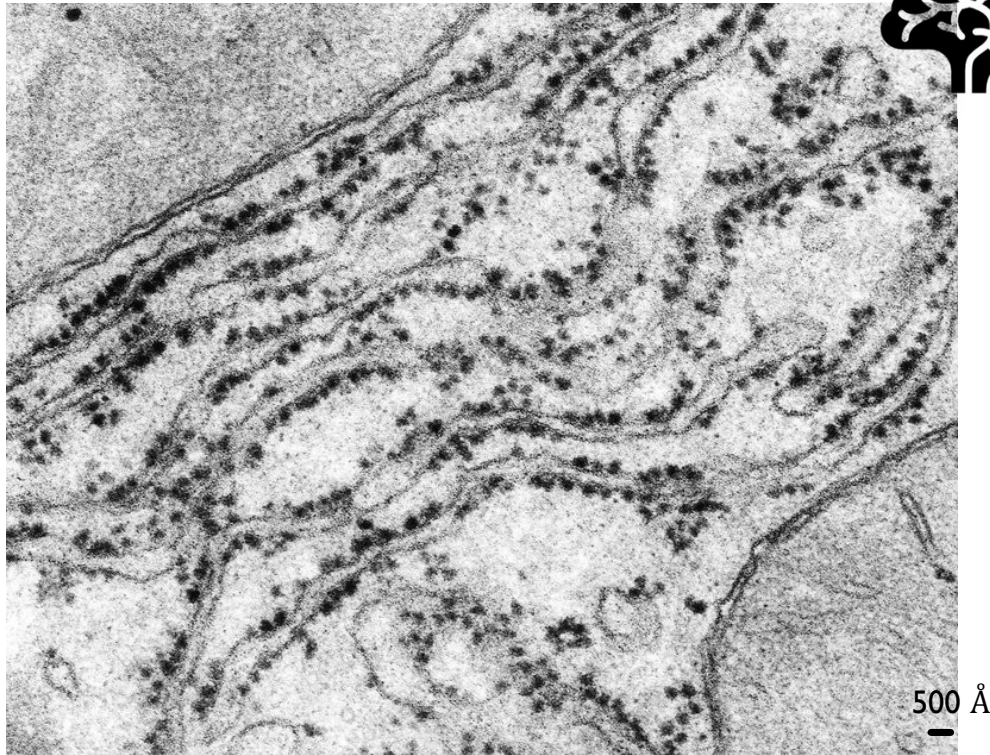
Continuité entre REG et enveloppe nucléaire



B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

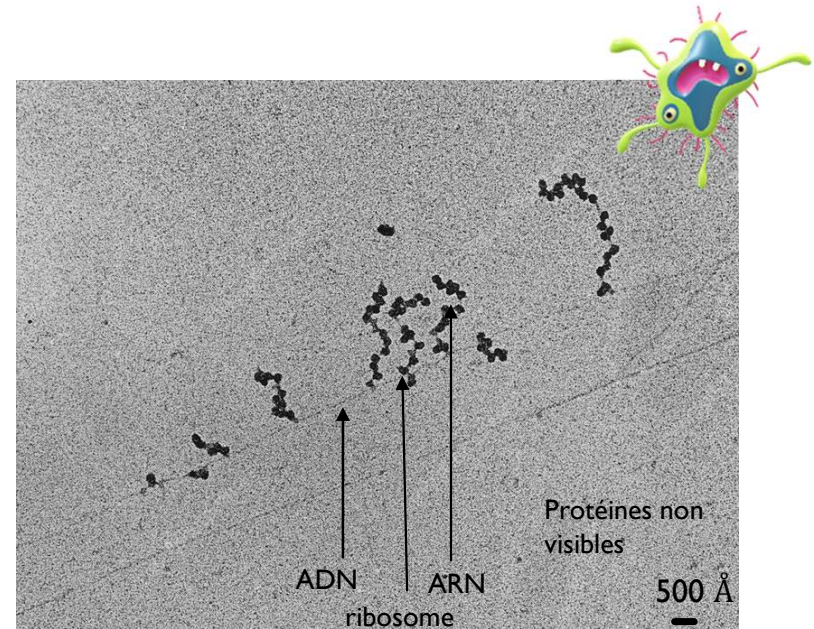
2.1. Les réticulums endoplasmiques



Réticulum endoplasmique rugueux et ribosomes (neurone), TEM

<https://www.sciencephoto.com/media/864649/view/rough-endoplasmic-reticulum-and-ribosomes-tem>

Ribosomes associés au REG



TEM de l'opéron du gène de structure d'E. coli

Ribosomes libres dans le cytosol

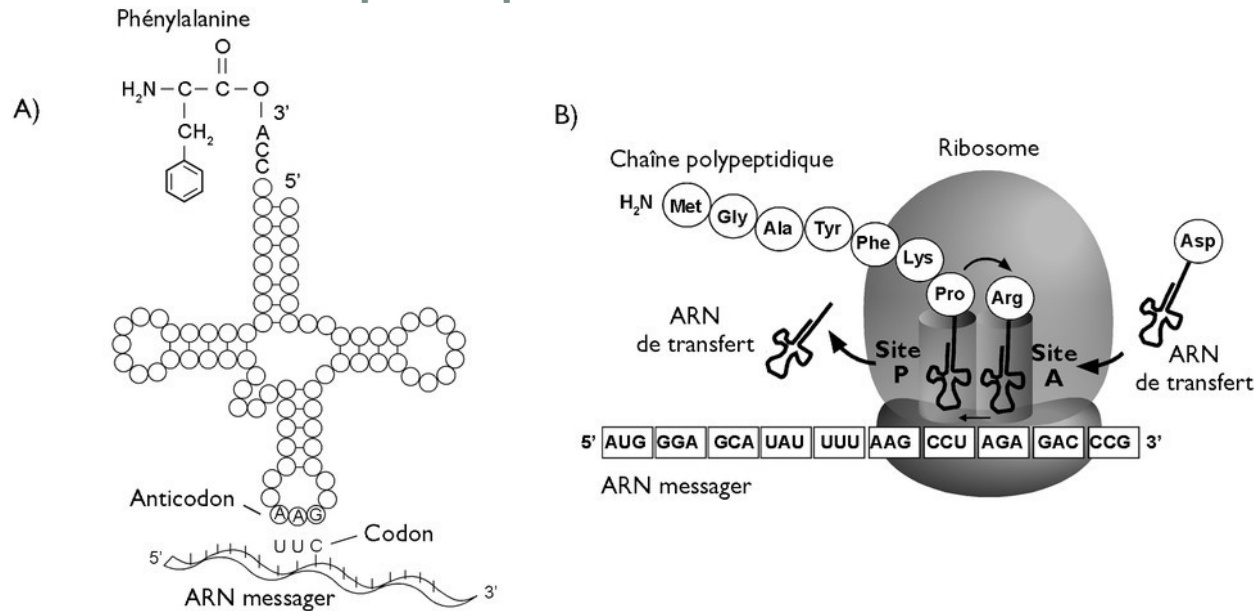
<https://www.sciencephoto.com/media/415768/view>

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

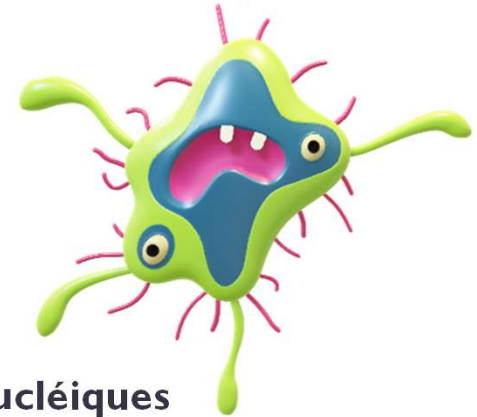
2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

42

2.1. Les réticulums endoplasmiques



Chaque bactérie contient environ 30 000 ribosomes et, dans les bactéries en pleine croissance, ceux-ci représentent près du quart du poids sec de la bactérie.



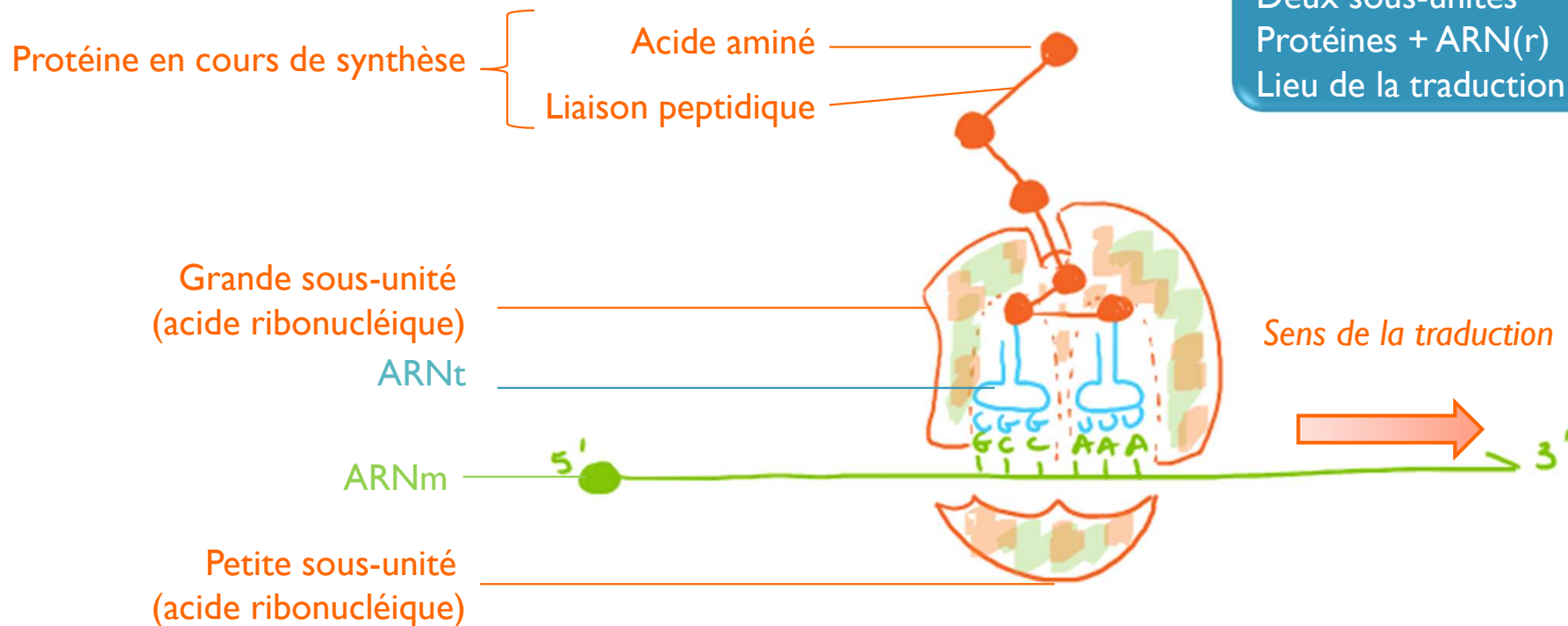
Le ribosome, tête de lecture, acteur de la traduction est composé d'acides ribonucléiques

Pas un organe !
Deux sous-unités
Protéines + ARN(r) (=ribonucléoprotéines)
Lieu de la traduction protéique

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

2.1. Les réticulums endoplasmiques



Le ribosome, tête de lecture, acteur de la traduction est composé d'acides ribonucléiques

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

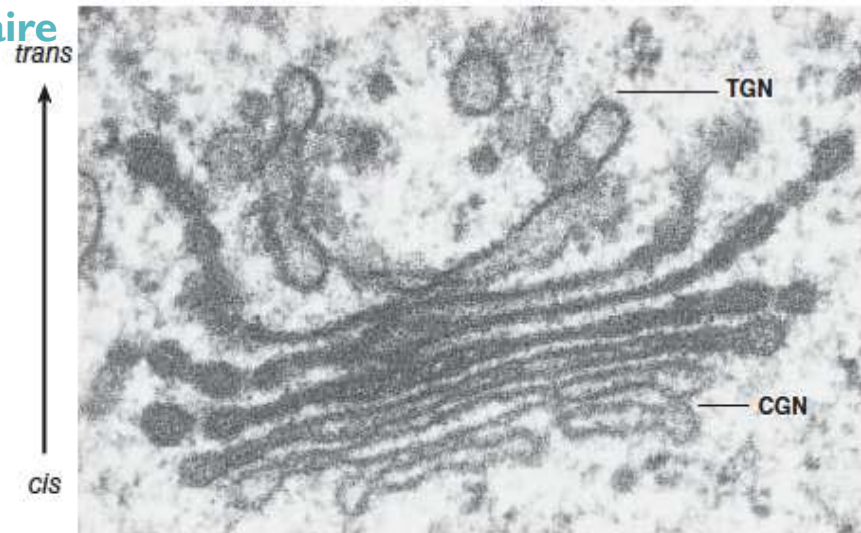
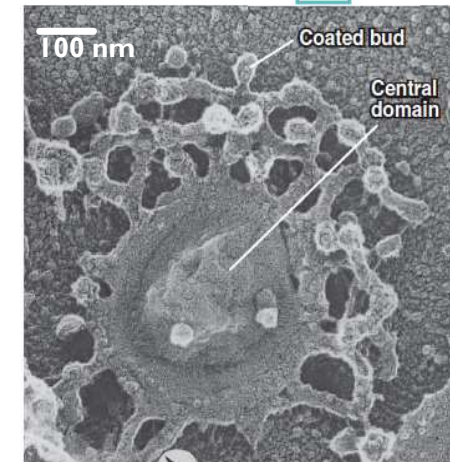
Cf. partie III



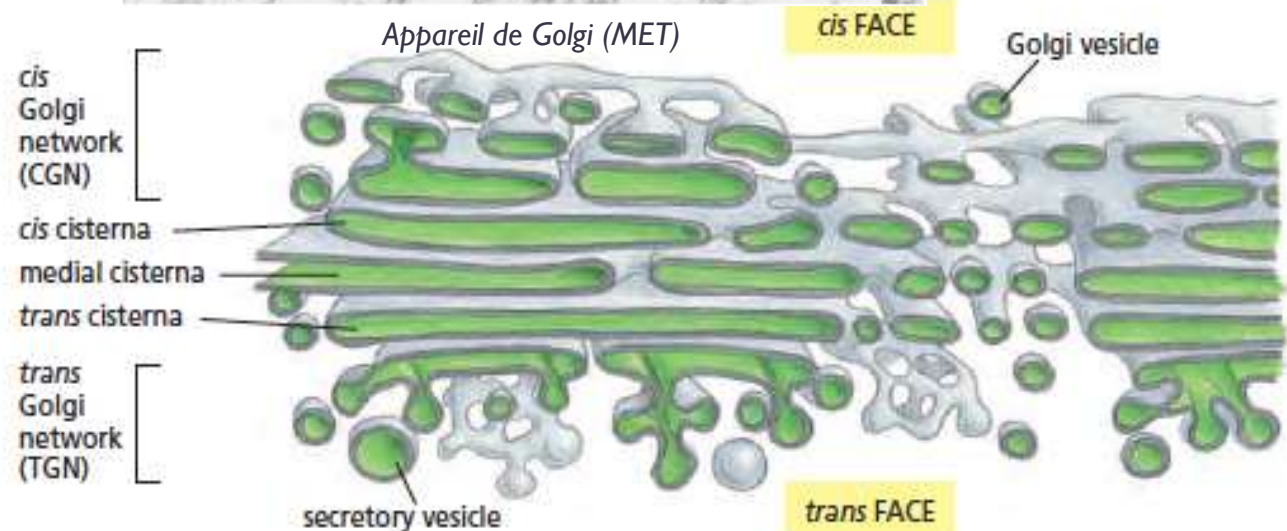
2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire

2.2. L'appareil de Golgi

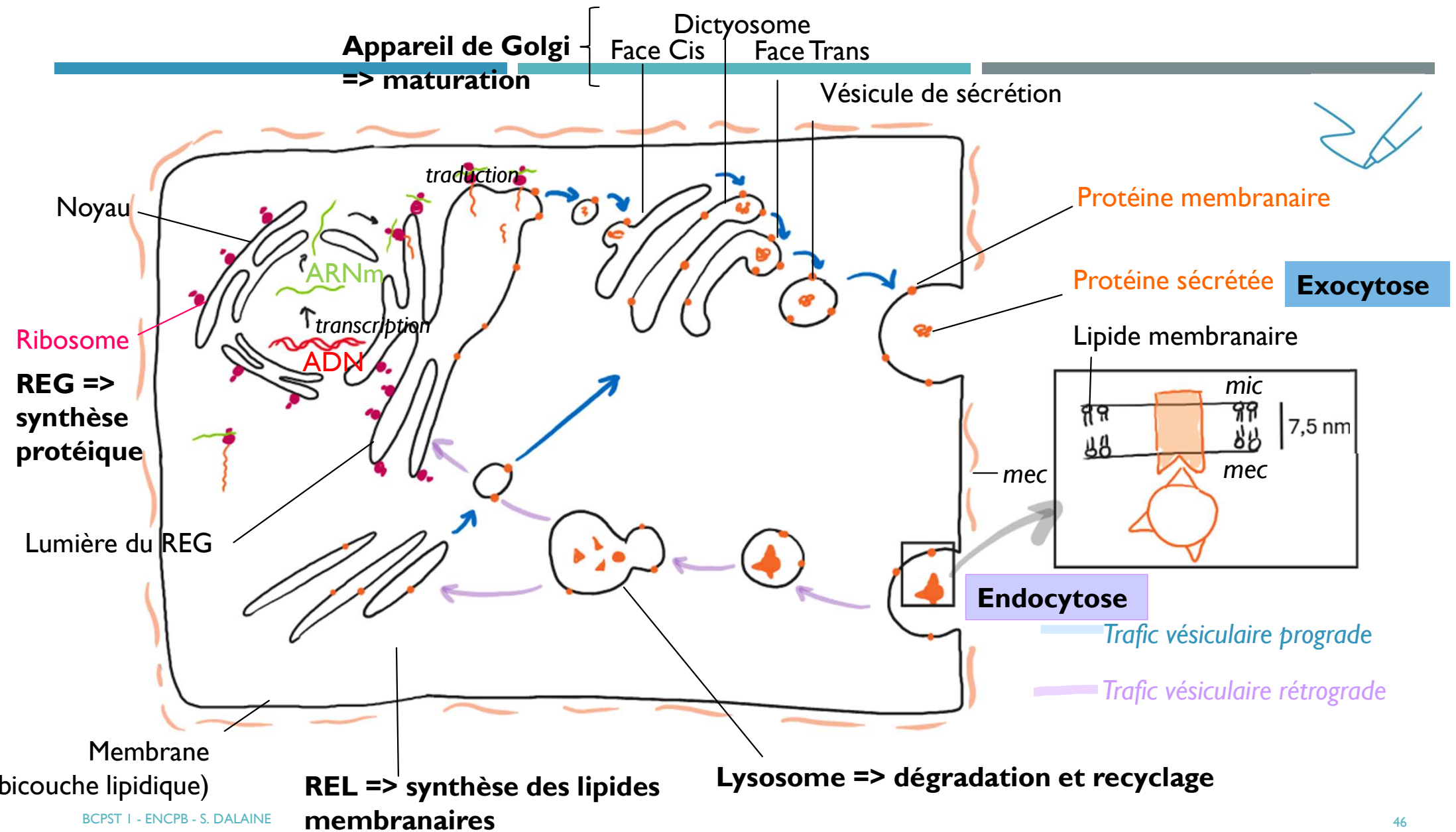
- **Appareil de Golgi** : système composé d'un ensemble de **dictyosomes** (= saccules en forme de disques aplatis et courbés) superposés
 - face **cis-Golgi** – orientée vers REG
 - face **trans-Golgi** – orientée vers vésicules
- Appareil de Golgi impliqué dans la **maturation** et **l'adressage** des protéines membranaires, transportées vers d'autres organites ou sécrétées



Dictyosome isolé (MEB)



Bourgeonnement de vésicules nées du REG, libérées de leur ribosome, transférées vers l'appareil de Golgi (MET) (Cell, Alberts, ed 1994, p. 50)

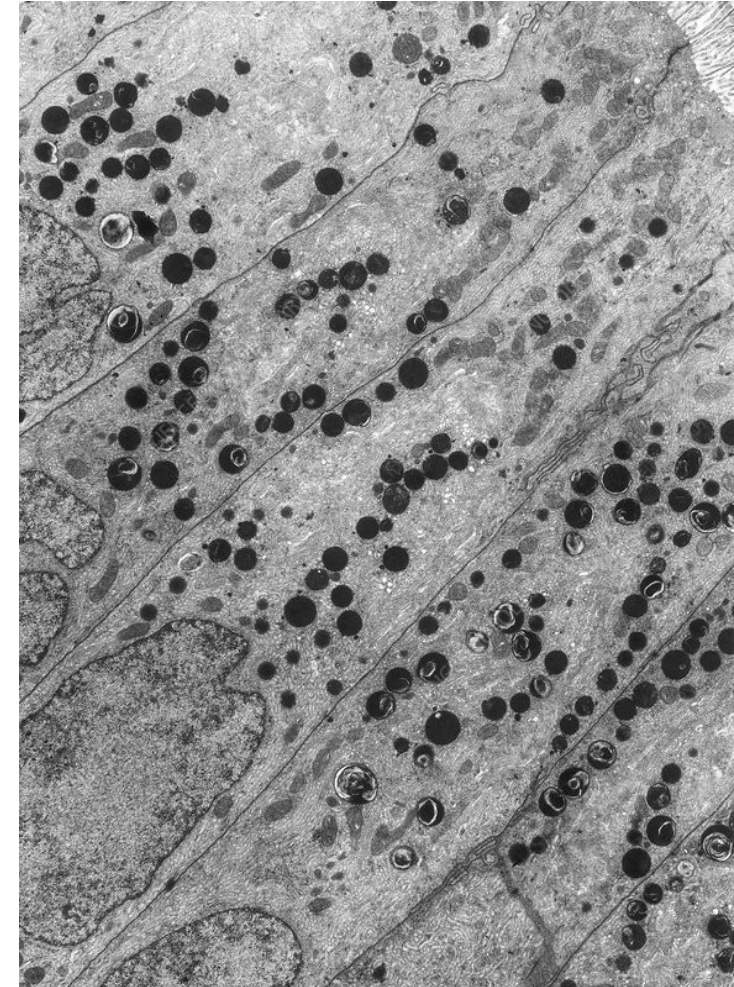




B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

3. Les lysosomes

- Lysosomes : **vésicules** entourées d'une membrane simple, de morphologies variées et mesurant 0,2-0,5 μm de diamètre
- Lysosomes = **pH acide (4-5)** contenant des **enzymes hydrolytiques** :
 - hydrolases acides (produites par le REG) : lipases, peptidases, nucléases, glycosidases, phosphatases, sulfatases
 - Mise en évidence des lysosomes : détection cytochimique de la **phosphatase acide** (cf. ci-contre)
- Membrane des lysosomes contient des protéines essentielles à la fonction des lysosomes
 - perméases $\rightarrow$ import de biomolécules
 - **pompes à H^+ $\rightarrow$ pH = 4-5**
 - **canaux à Cl^-**



Lysosomes dans l'épithélium de l'épididyme (MET)

<https://www.sciencephoto.com/media/997122/view/lysosomes-in-epididymal-epithelium-tem>

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

3. Les lysosomes

Fonctions :

- Les enzymes hydrolytiques réalisent les **digestions intracellulaires** :
 - **destruction et recyclage de** molécules (déchets)
 - **Autophagie** (organites)
- Le pH acide du lysosome permet aux enzymes hydrolytiques de fonctionner



→ **lysosome = petit organe mais essentiel à la vie cellulaire, pour assurer le turnover des organites et la dégradation des déchets**

Cf animation : lysosome dégradant une vieille mitochondrie et lysosome dégradant une bactérie

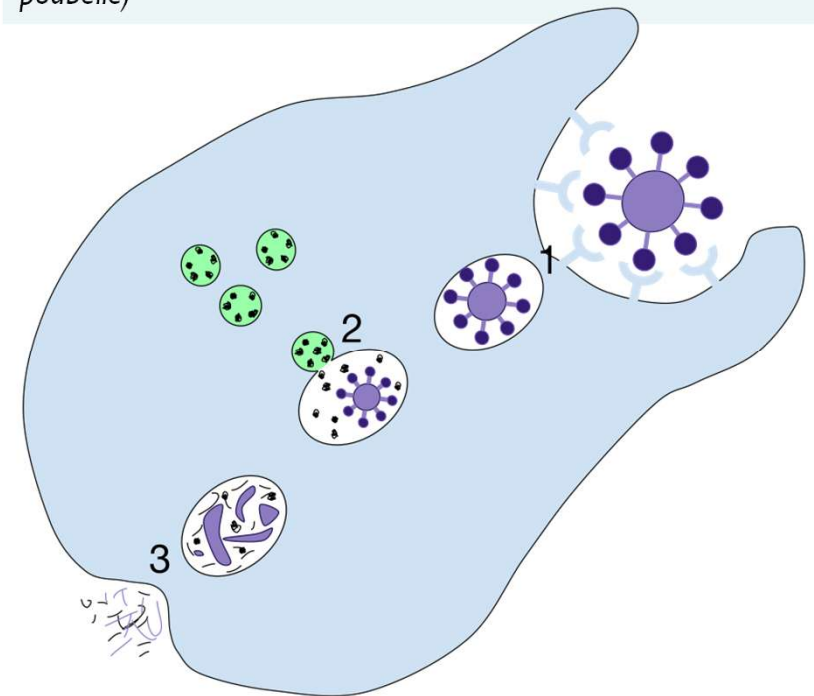
<http://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=51576&demande=desc#>

3 types de lysosomes :

- ✓ **Endolysosomes** : fusion d'un endosome avec un lysosome
- ✓ **Autophagolysosome** : autophagie des organites âgés
- ✓ **Phagolysosomes** dans les cellules phagocytaires



NB : **pas de lysosome chez les végétaux** (vacuole fait office de poubelle)



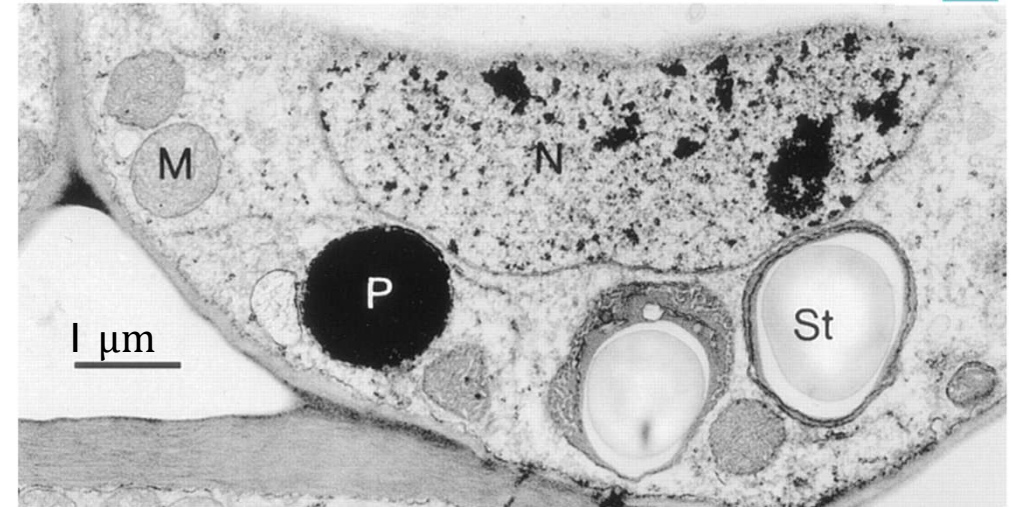
Dessin du processus normal de phagocytose. Les lysosomes (en vert, 2) fusionnent avec un phagosome (1) pour former un phagolysosome (3). 48



B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

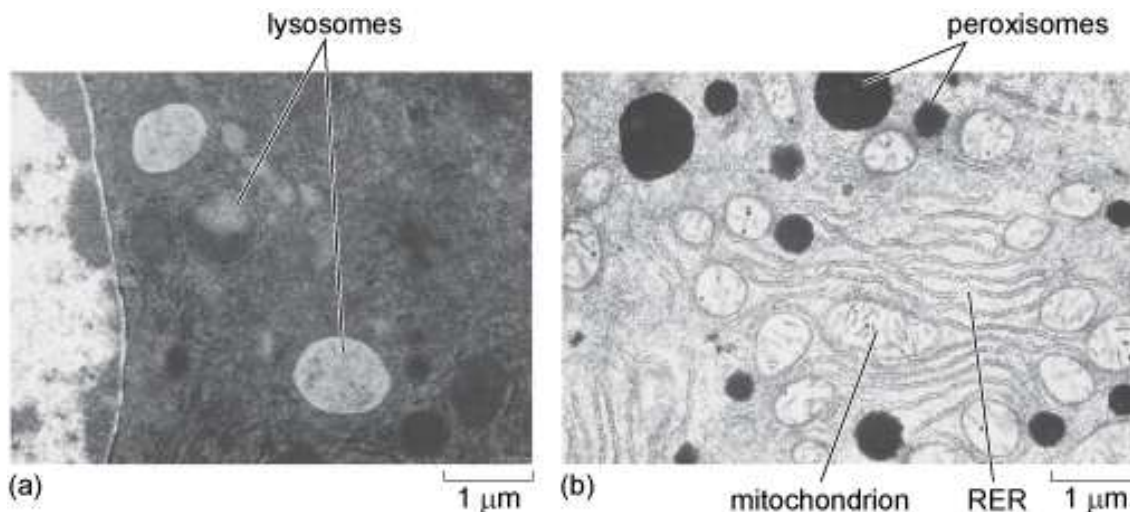
4. Les peroxysomes

- **Peroxisomes** : **vésicules** entourées d'une membrane simple, mesurant 0,2-0,5 μm de diamètre
- Ils renferment des **enzymes oxydatives** qui produisent et décomposent le **peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)**.
 - Mise en évidence des peroxysomes par marquage cytochimique de la catalase



P = peroxysome, M=mitochondrie, N=noyau, St=amyloplaste

Mise en évidence du péroxysome par localisation cytochimique de l'uricase chez *Vigna unguiculata* (Fabacées) (MET)



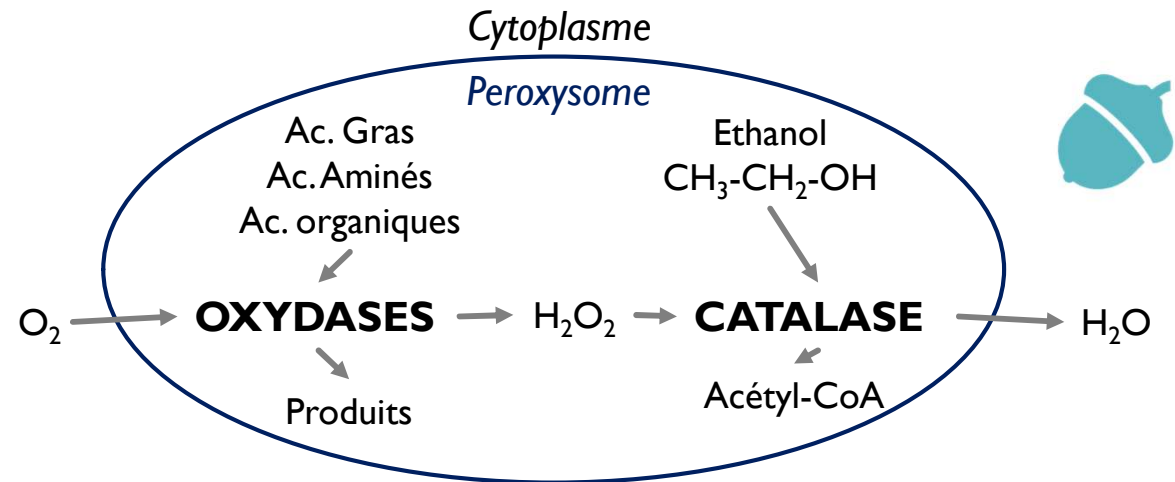
Peroxisome et lysosomes deux organites qui se ressemblent (MET).
Ils sont distinguables par fractionnement cellulaire

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

4. Les peroxysomes

Fonctions :

- **détoxification** (notamment dans le **foie**, les **cellules rénales**)
 - 50% de l'alcool ingéré éliminé au niveau du foie grâce aux peroxysomes donnant de l'acétaldéhyde
- rôle dans le **catabolisme** (β -oxydation) **des acides gras**



Les oxydases produisent H₂O₂ → nocif pour la cellule

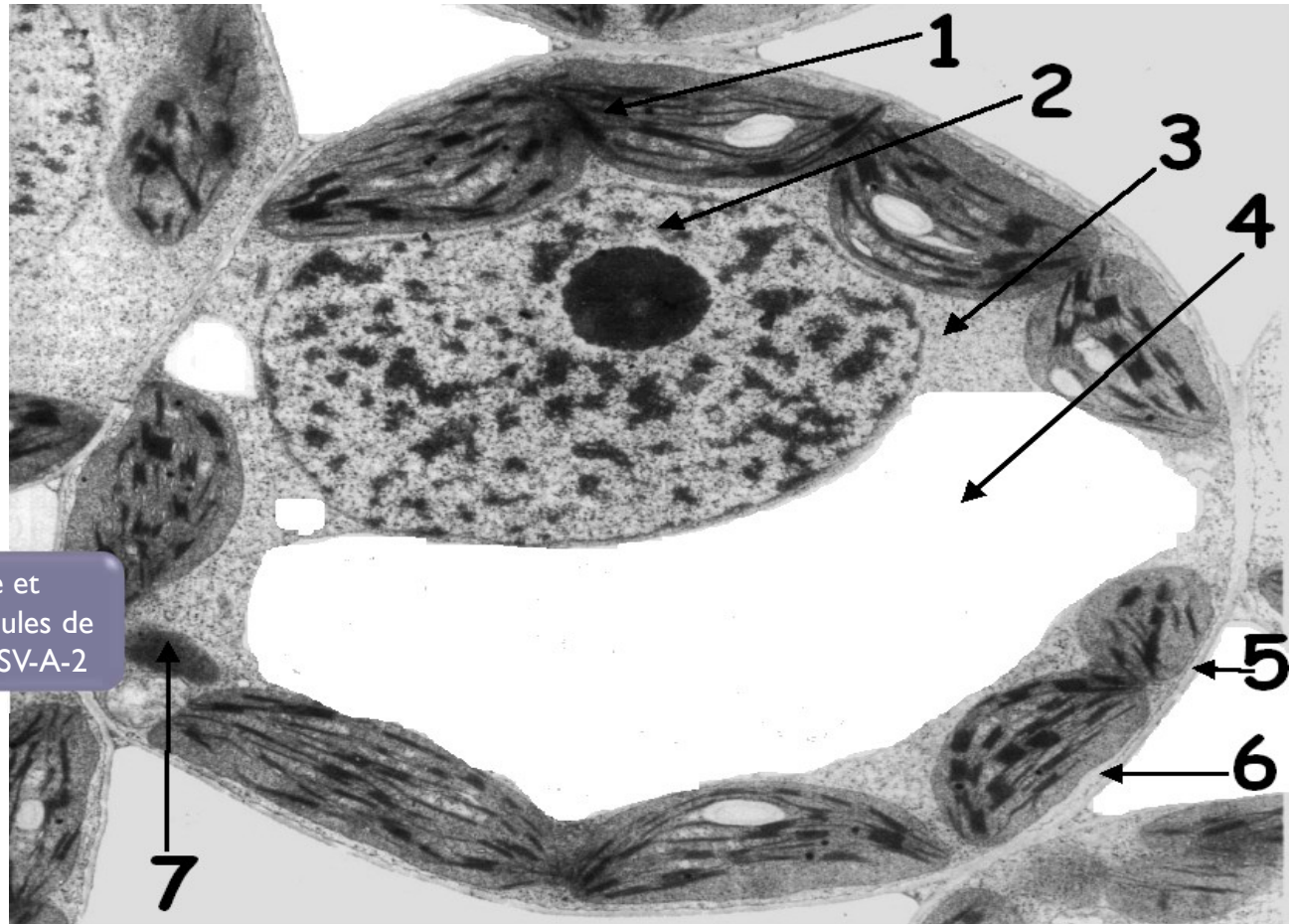
Si excès d'H₂O₂ la catalase le transforme en eau : $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

5. Les vacuoles

- **vacuoles** : organites de taille variable
- contenu souvent **assez dilué**
- **cellules végétales**, mais également chez certaines cellules animales, **fongiques** ou chez certains unicellulaires
- fonctions très variées :
 - Stockage des photosynthétats de type saccharose
 - stockage de déchets,
 - stockage de pigments,
 - stockage d'eau (plasmolyse et turgescence)
 - dégradation de certains composés chimiques,
 - maintien de l'équilibre hydrique des cellules

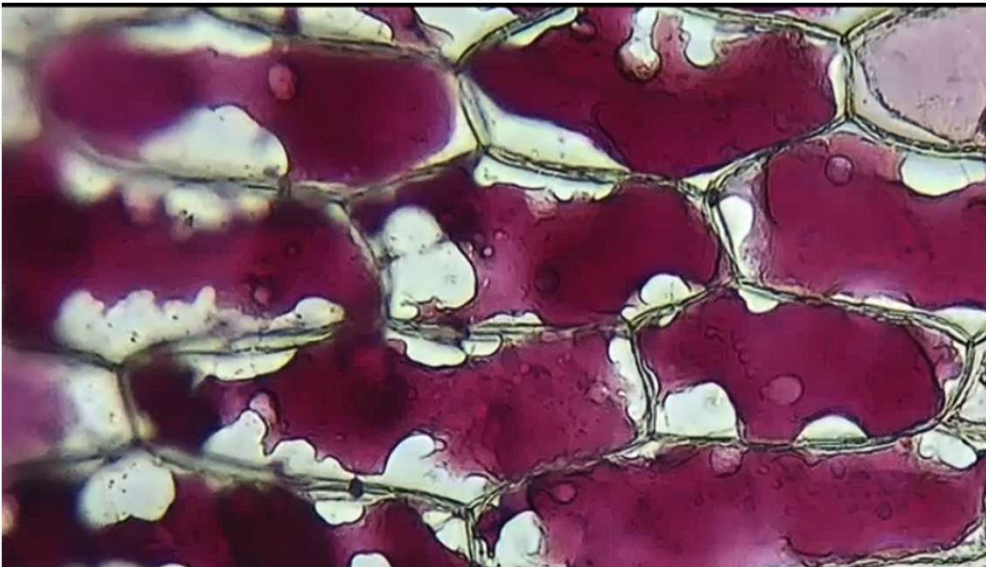
Cf turgescence et plasmolyse des cellules de garde du stomate SV-A-2



électronographie d'une cellule végétale à légender, indiquer une échelle

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

5. Les vacuoles



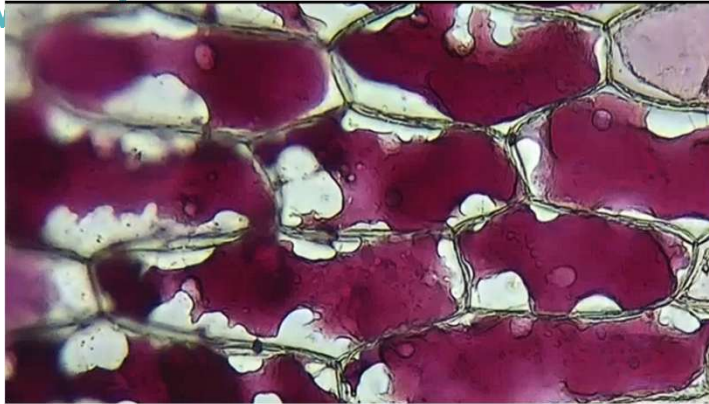
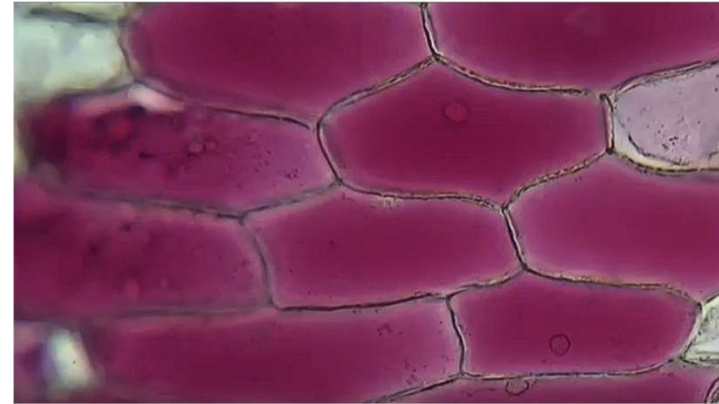
Cellules de l'épiderme de l'oignon rouge dans un milieu **hypertonique**, concentré en saccharose (→ sortie d'eau de la vacuole, de la cellule) observée au MO
=> **PLASMOLYSE**



Cellules de l'épiderme de l'oignon rouge dans un milieu **hypotonique** (→ entrée d'eau dans la vacuole) observée au MO
=> **TURGESCE**

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

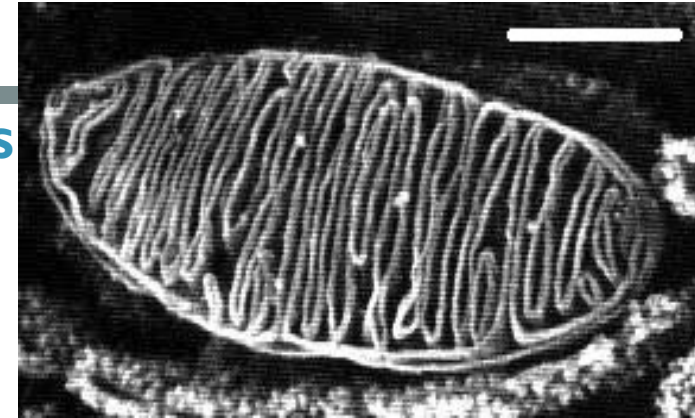
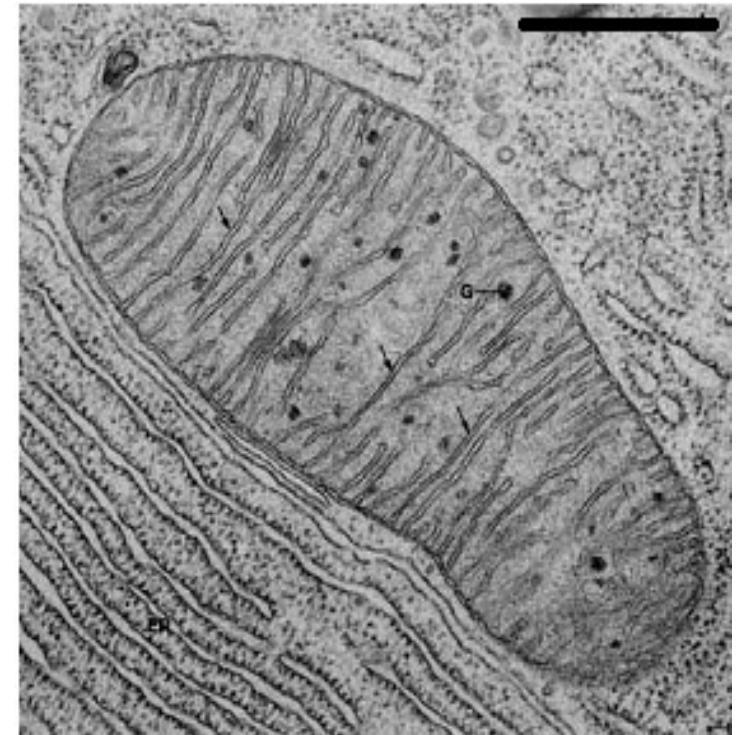
5. Les v



B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

- Structure:
 - Double membrane
 - Crête
 - Espace intermembranaire
 - Matrice
 - Granules denses aux e^- (riches en Ca^{2+} cf rôle de séquestration de ce 2nd messenger)
- Localisation
 - **Près de REG** => rôle dans la division des mitochondries
- ~ **taille des bactéries** (qqz μm)
- Organites à **double membrane** → héritage probable d'une **endosymbiose primaire** (bactérie au métabolisme oxydatif du genre proche des Rickettsies, -2 Ga).
- Quantité variable selon le type cellulaire étudiée et son métabolisme associé (oxydation vs fermentation)

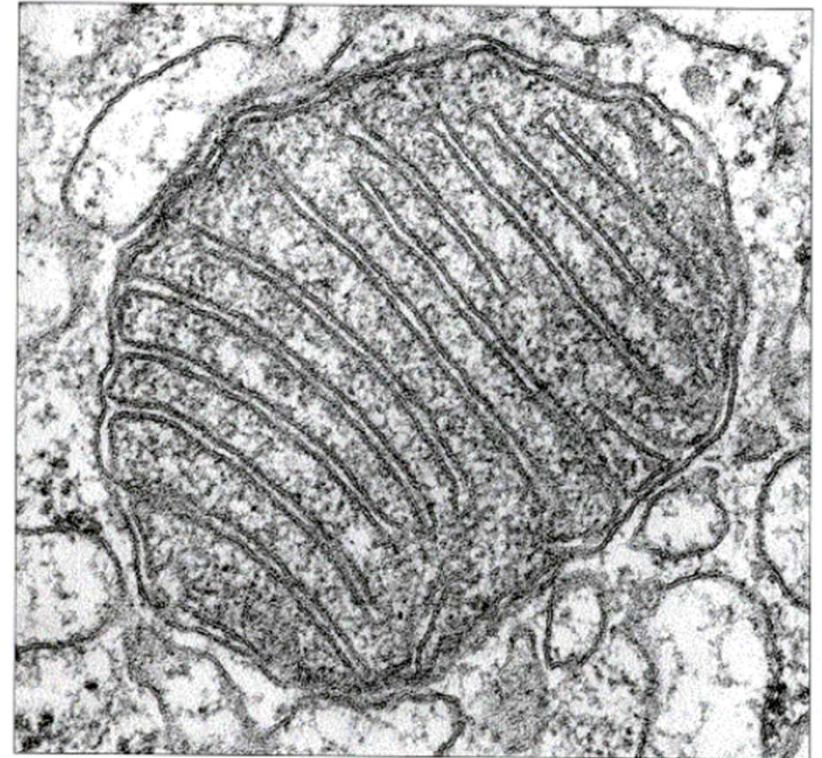




B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

- **centrales énergétiques** : oxydation totale (via l'entrée d' O_2) des molécules organiques apportées par l'alimentation (pyruvate).
- Organite parcouru par **flux de matière**
 - entrée de pyruvate (produit par oxydation du glucose via la glycolyse)
 - Entrée d' O_2 , d'ADP, Pi, coenzymes réduites, de Ca^{2+} Cf SV-E
 - **sortie d'ATP, de CO_2 , d' H_2O et de coenzymes oxydées, de Ca^{2+}**
 - **matrice mitochondriale**: oxydation des molécules organiques au sein du **cycle de Krebs**, → (NADH, H^+ , $FADH_2$, appelées coenzymes redox).
 - **membrane interne = crêtes mitochondriales**: complexes à fonction oxydo-réductrice transfèrent les électrons des coenzymes vers le dioxygène :→ réduction de dioxygène en eau.
 - ⇒ Translocation de H^+ de la matrice vers l'**espace intermembranaire**
 - ⇒ **gradient de protons**
 - ⇒ Synthèse d'ATP au sein de ATPsynthase



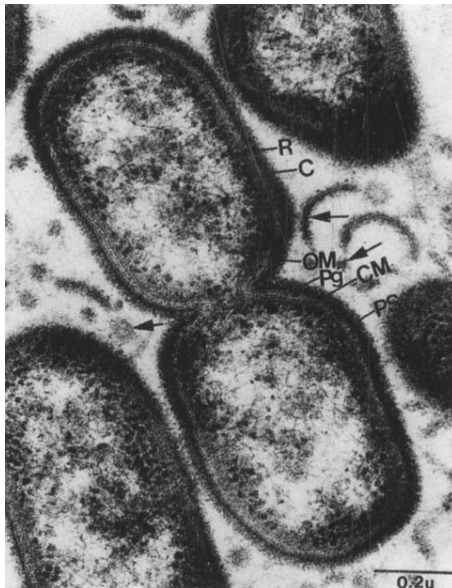
100 nm

Électronographie d'une mitochondrie révélant les crêtes (digitations) et la double membrane.

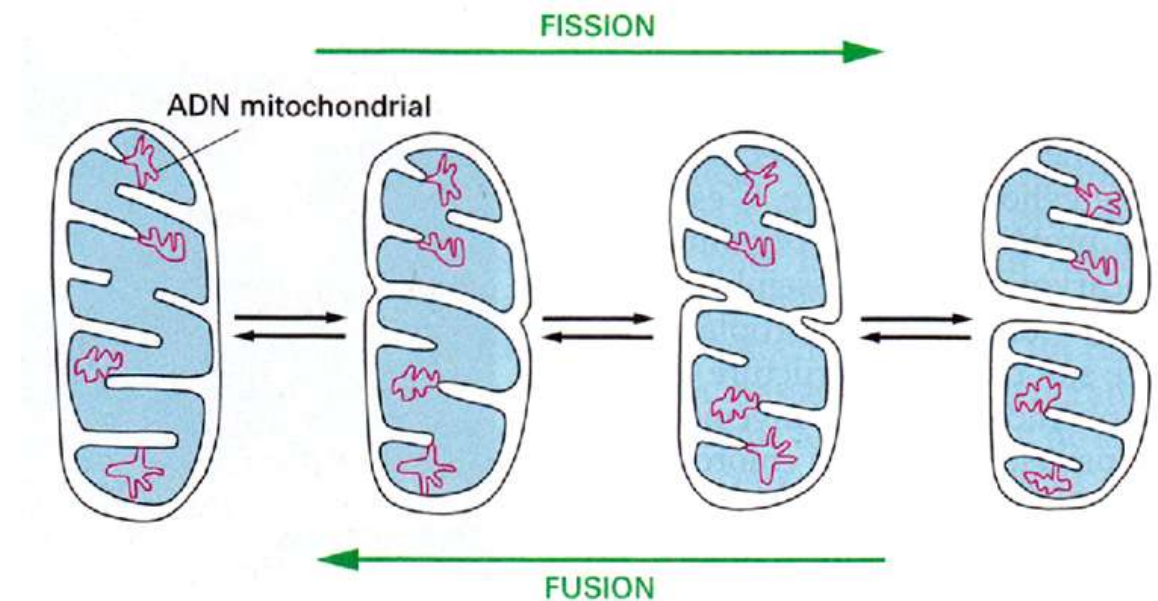
B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

- Mitochondrie, **organe semi-autonome**
 - propre **ADN**
 - **ribosomes mitochondriaux**
 - Multiplication de l'organe par division binaire



Bactérie (*Porphyromonas gingivalis*)
en cours de division (MET)

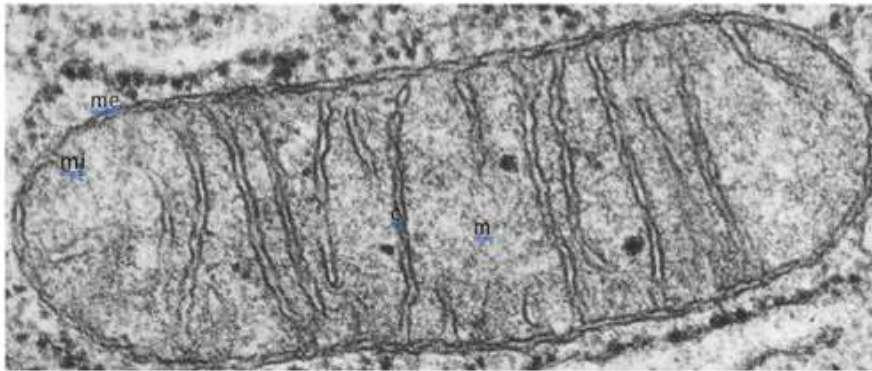


Fission et fusion mitochondriales

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

57

6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif



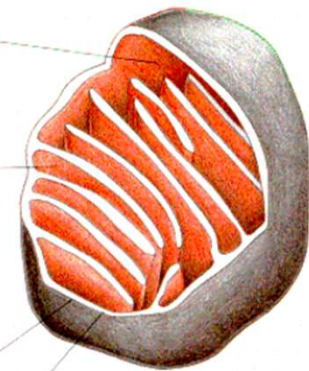
Une mitochondrie d'un hépatocyte humain au MET me: membrane externe; mi : membrane interne; c: crête; m: matrice. X 150 000

Matrix. The matrix contains a highly concentrated mixture of hundreds of enzymes, including those required for the oxidation of pyruvate and fatty acids and for the citric acid cycle. The matrix also contains several identical copies of the mitochondrial DNA genome, special mitochondrial ribosomes, tRNAs, and various enzymes required for expression of the mitochondrial genes.

Inner membrane. The inner membrane is folded into numerous cristae, which greatly increases its total surface area. It contains proteins with three types of functions: (1) those that carry out the oxidation reactions of the respiratory chain, (2) an enzyme complex called *ATP synthase* that makes ATP in the matrix, and (3) specific transport proteins that regulate the passage of metabolites into and out of the matrix. Since an electrochemical gradient that drives the *ATP synthase* is established across this membrane by the respiratory chain, it is important that the membrane be impermeable to most small ions.

Outer membrane. Because it contains a large channel-forming protein (called porin), the outer membrane is permeable to all molecules of 5000 daltons or less. Other proteins in this membrane include enzymes involved in mitochondrial lipid synthesis and enzymes that convert lipid substrates into forms that are subsequently metabolized in the matrix.

Intermembrane space. This space contains several enzymes that use the ATP passing out of the matrix to phosphorylate



Membrane externe
Membrane interne
Espace intermembranaire
Matrice

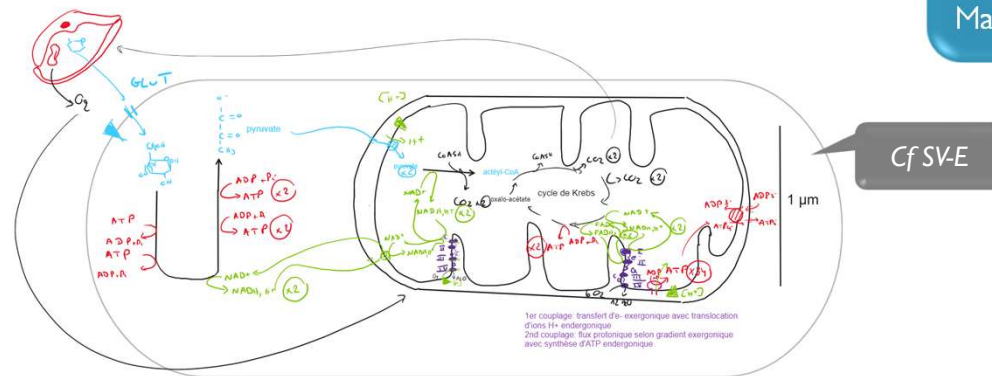
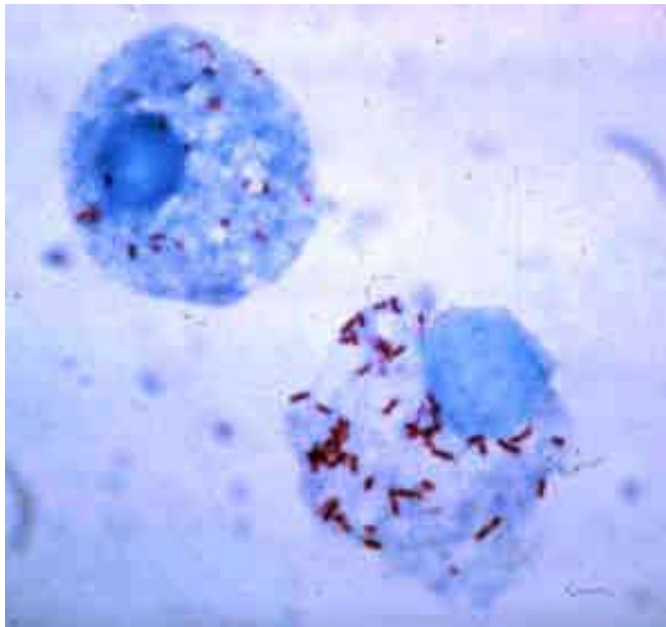


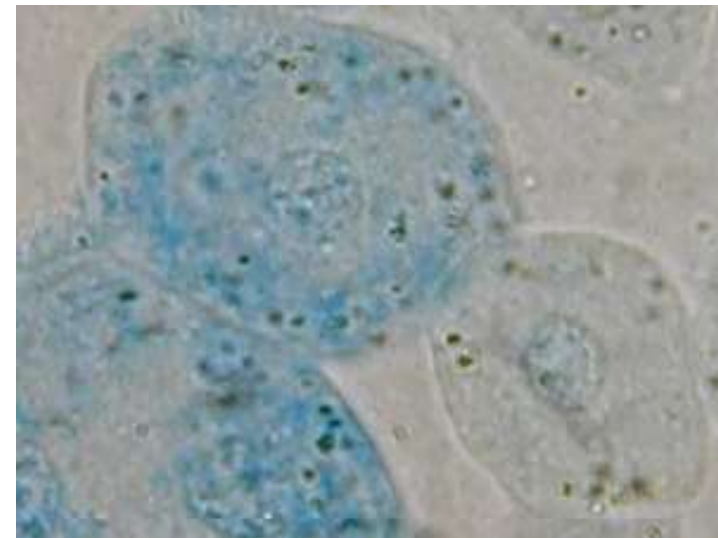
Schéma bilan de la respiration cellulaire

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif



Cellules d'hémolymph de tique, infectées par *Rickettsia rickettsii*. (Gram -) (coloration Gram)



Cellules de foie de lapin (x 1000, objectif à immersion ; zoom numérique x 2, coloration par le bleu de méthylène).

Riches en mitochondries

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

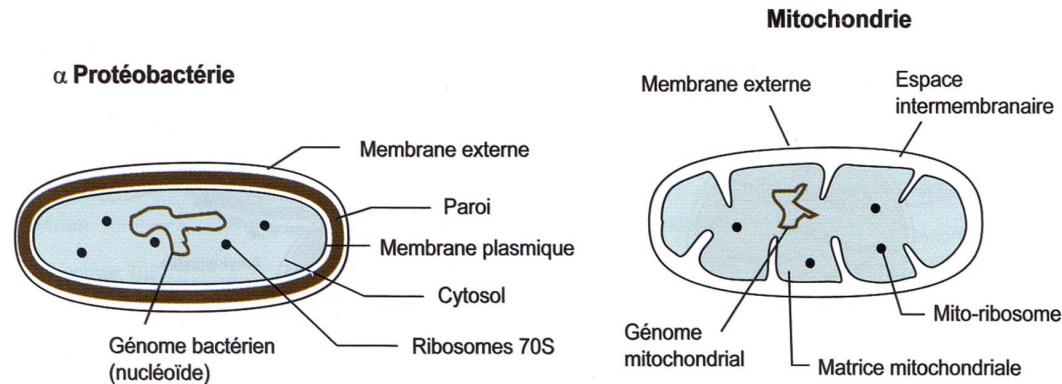
6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

ENCART SUR LA THÉORIE ENDOSYMBIOTIQUE

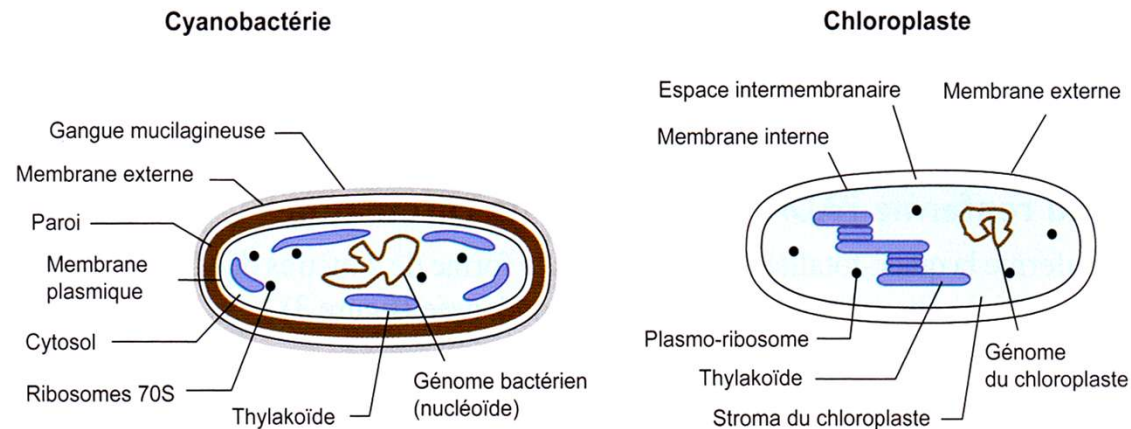
- Mitochondries et chloroplastes présentent des similitudes avec certains procaryotes



*Structures comparées
d'une α -protéobactérie
et d'une mitochondrie*



*Comparaison de
l'organisation des
Cyanobactéries et du
chloroplaste*

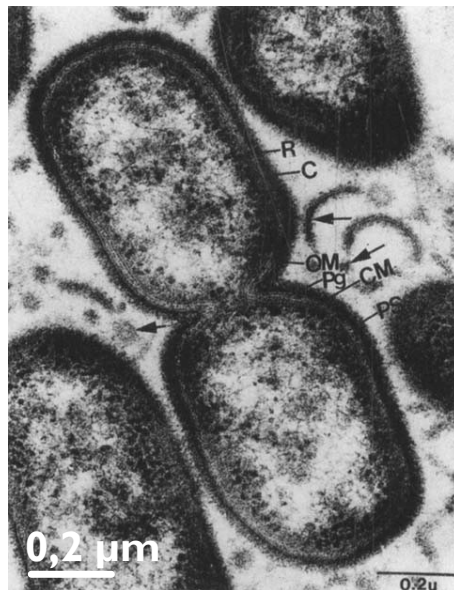


B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

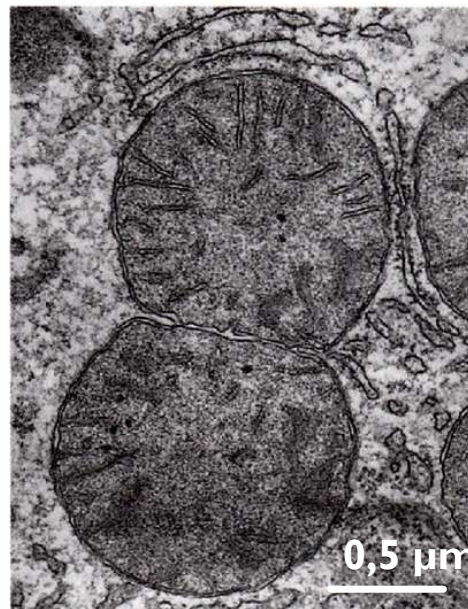
6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

ENCART SUR LA THÉORIE ENDOSYMBIOTIQUE

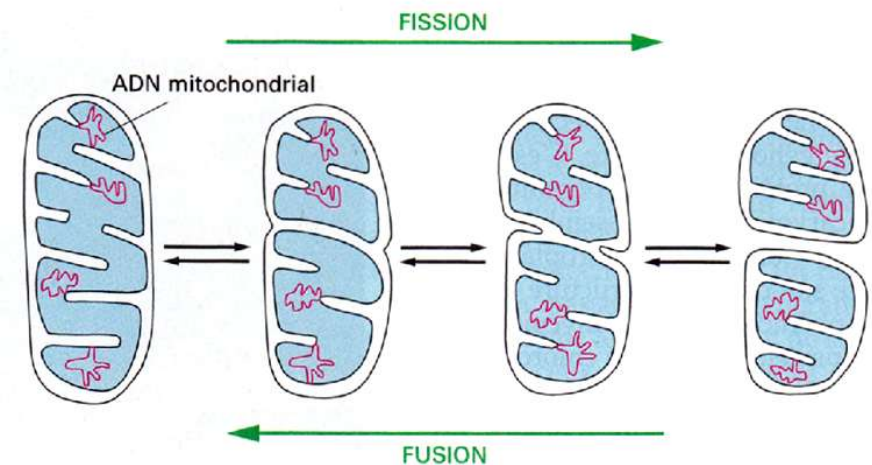
- Mitochondries et chloroplastes peuvent se diviser de façon autonome (fission) par rapport à la cellule.
Rem : les mitochondries peuvent aussi fusionner (fusion)
- Le mécanisme de fission ressemble sur le principe à celui de la division bactérienne



Bactérie (*Porphyromonas gingivalis*)
en cours de division (MET)



Mitochondrie en cours de fission dans
une cellule hépatique (MET)



Fission et fusion mitochondriales

B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

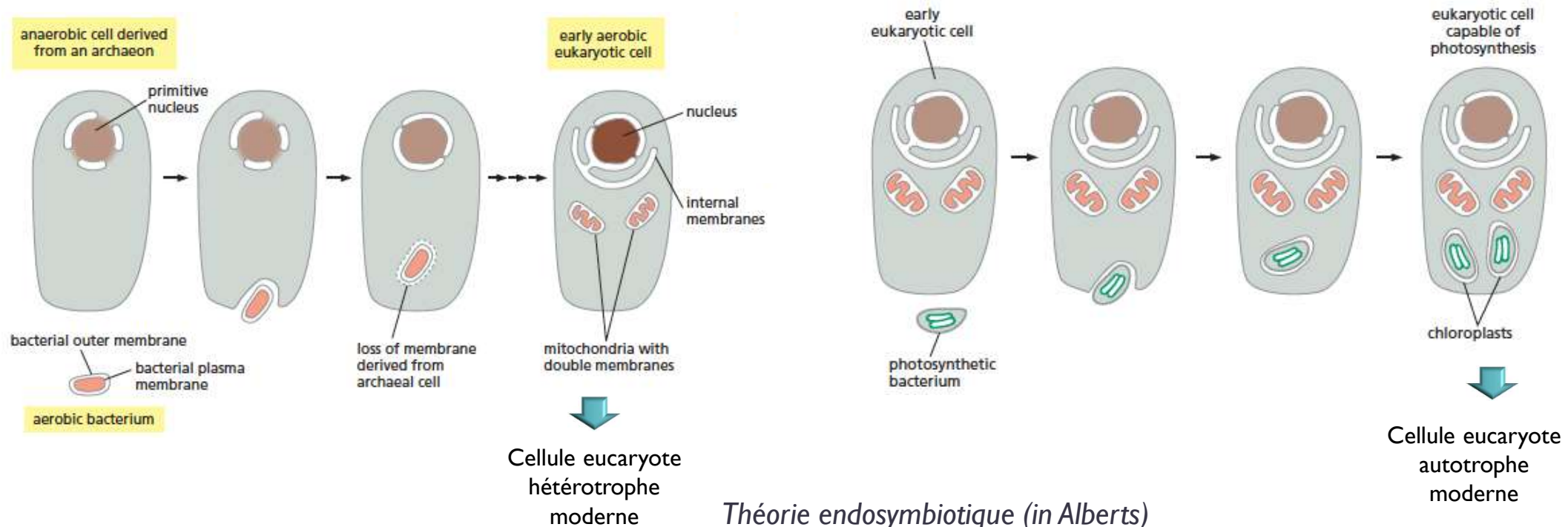
6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif



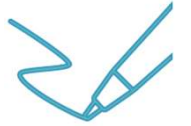
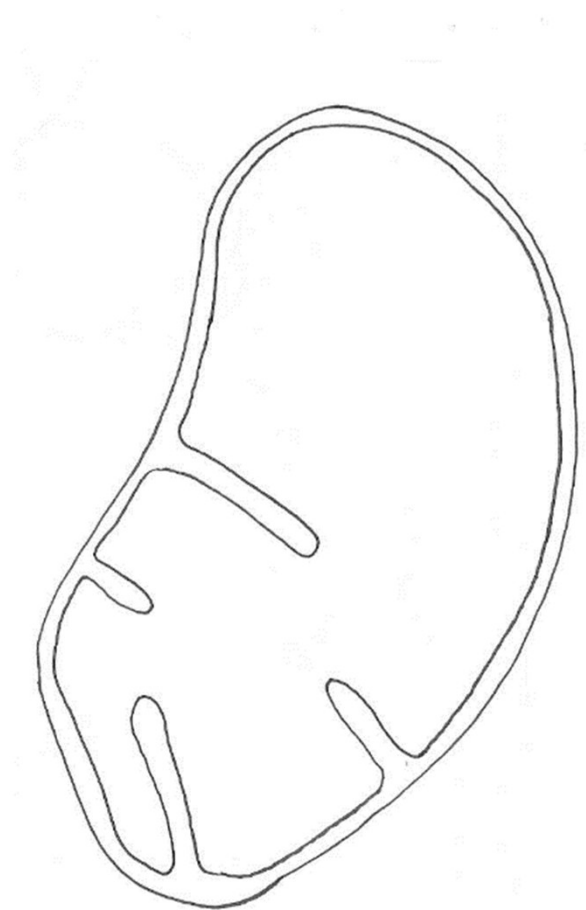
ENCART SUR LA THÉORIE ENDOSYMBIOTIQUE

- Mitochondries et chloroplastes proviendraient d'épisodes de phagocytose d'une eubactérie par une cellule eucaryote.
- Evolution en symbiose → **Théorie endosymbiotique**

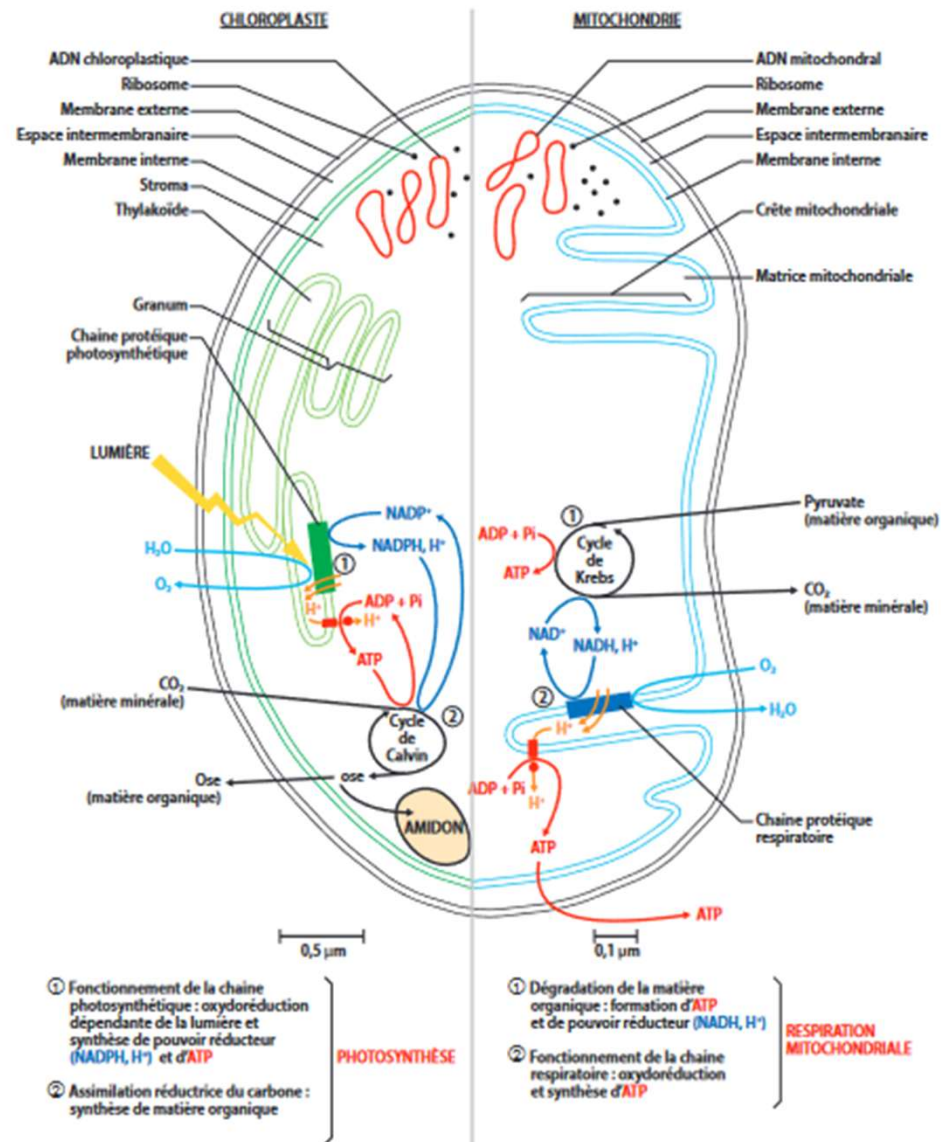
Symbiose : n.f. interaction entre 2 espèces avec bénéfices réciproques



6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif

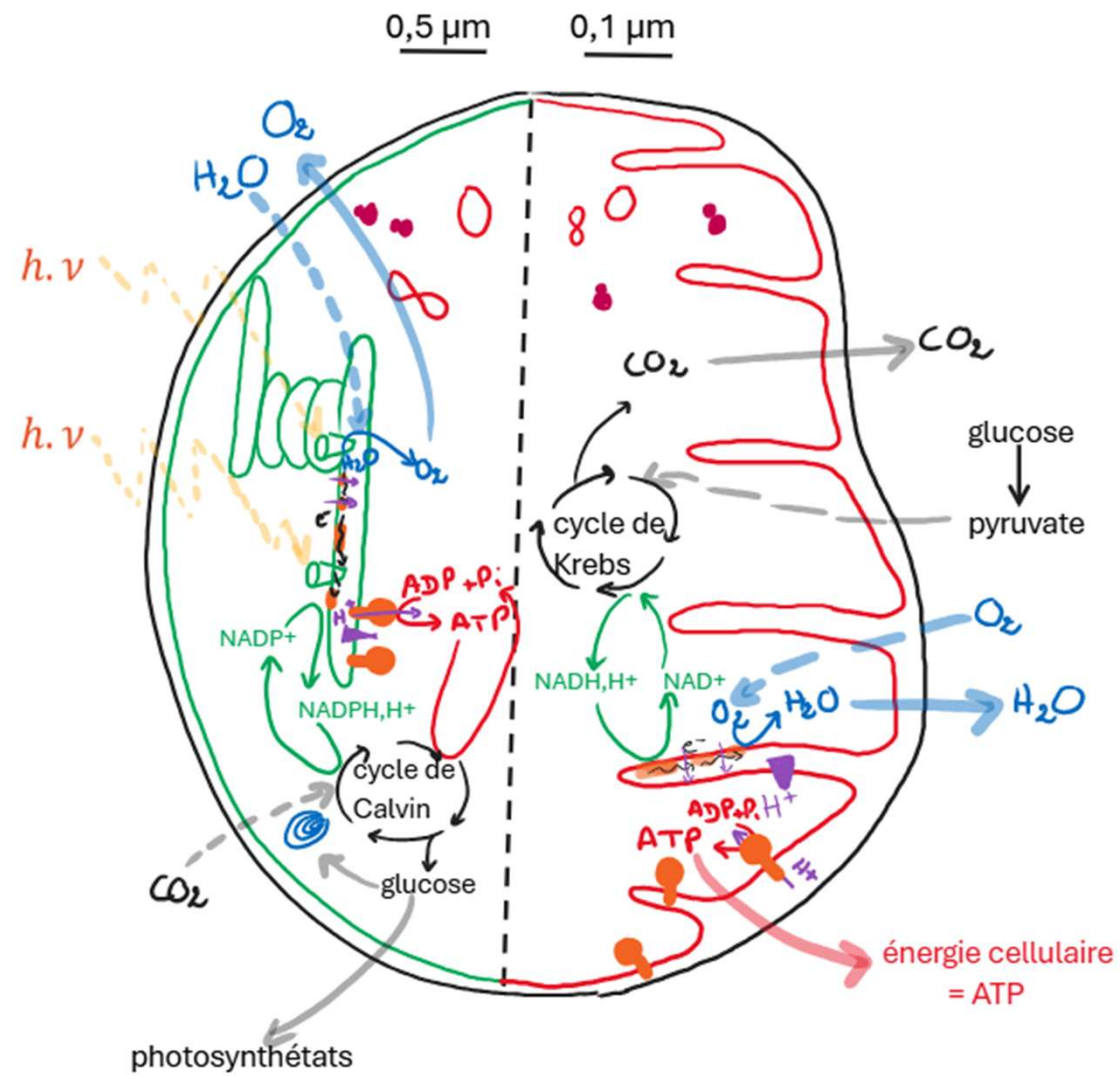


-  ADN circulaire
- Plasmide
- Ribosome



► **Figure 6.7.** La mitochondrie et le chloroplaste, des organites semi-autonomes présentant une place centrale dans le métabolisme énergétique de la cellule.

(in Vuibert)

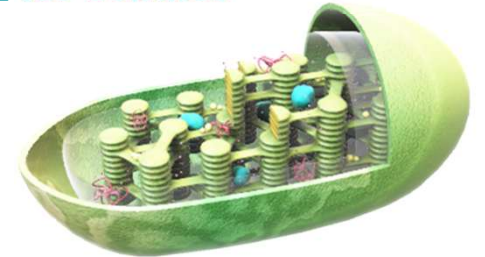
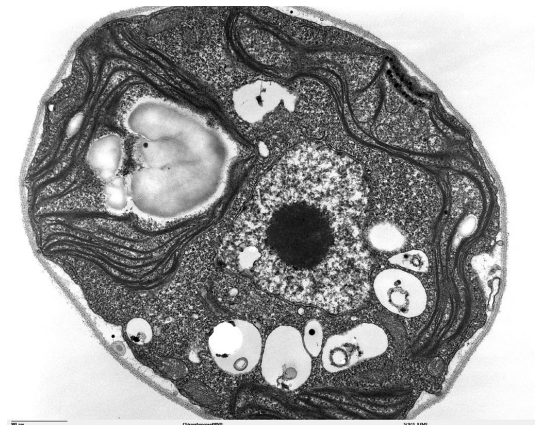
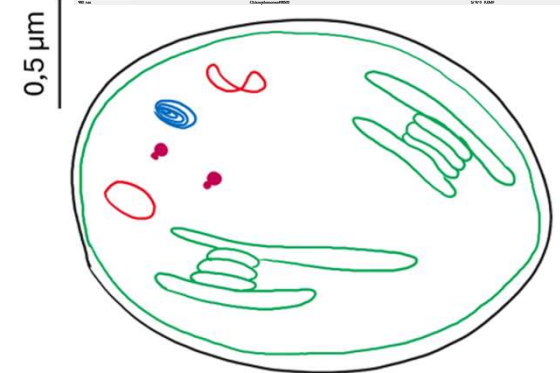


B. LES CELLULES EUCARYOTES : DES CELLULES COMPARTIMENTÉES

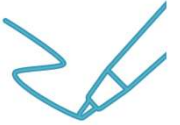
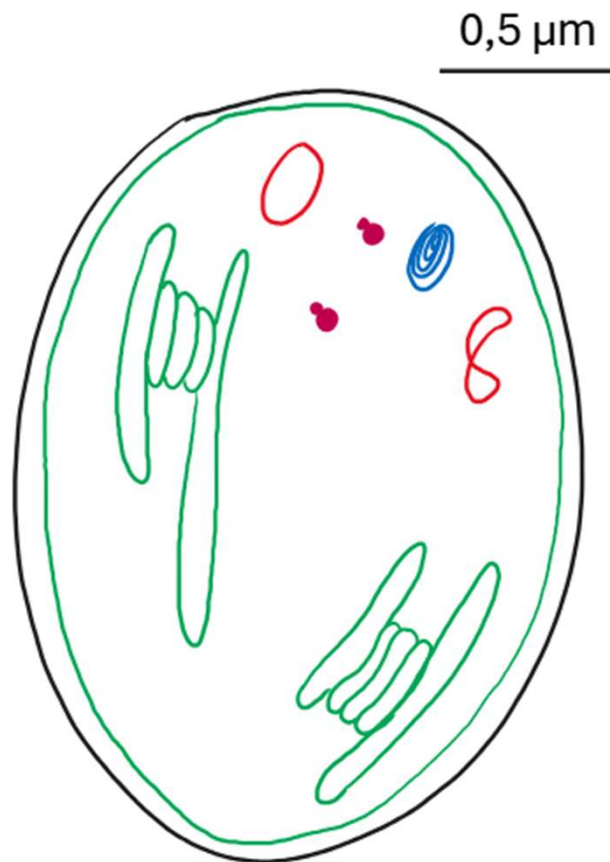
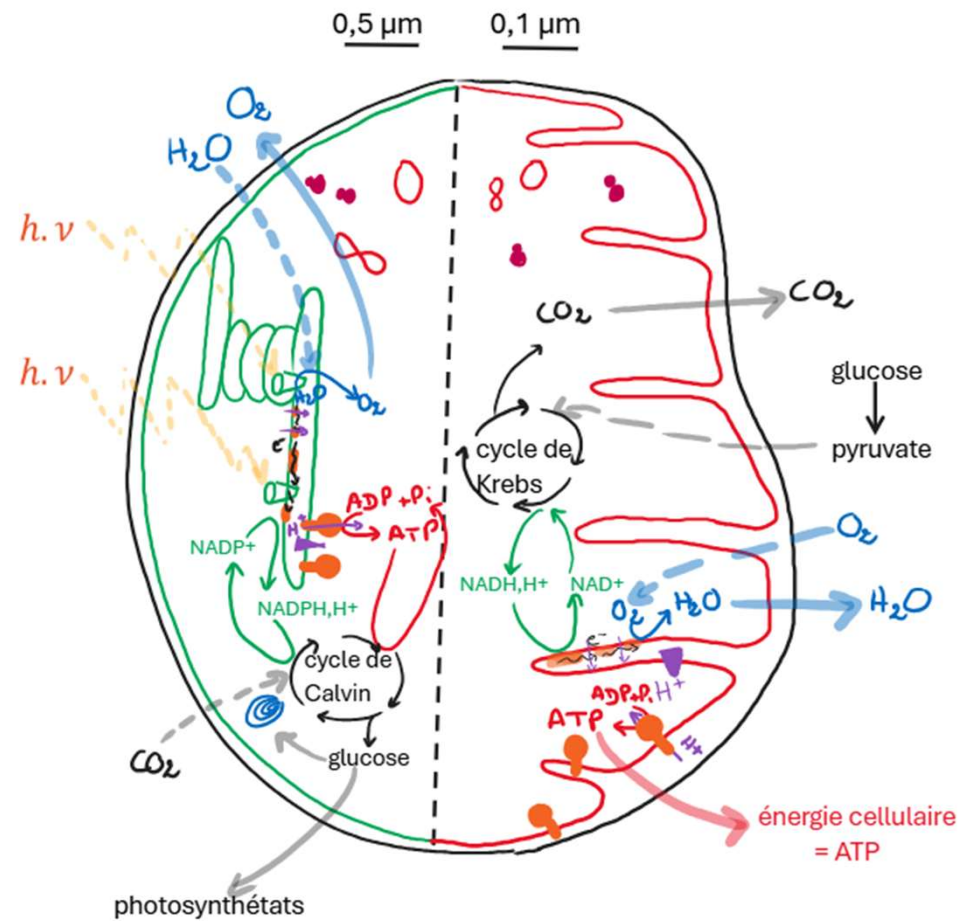


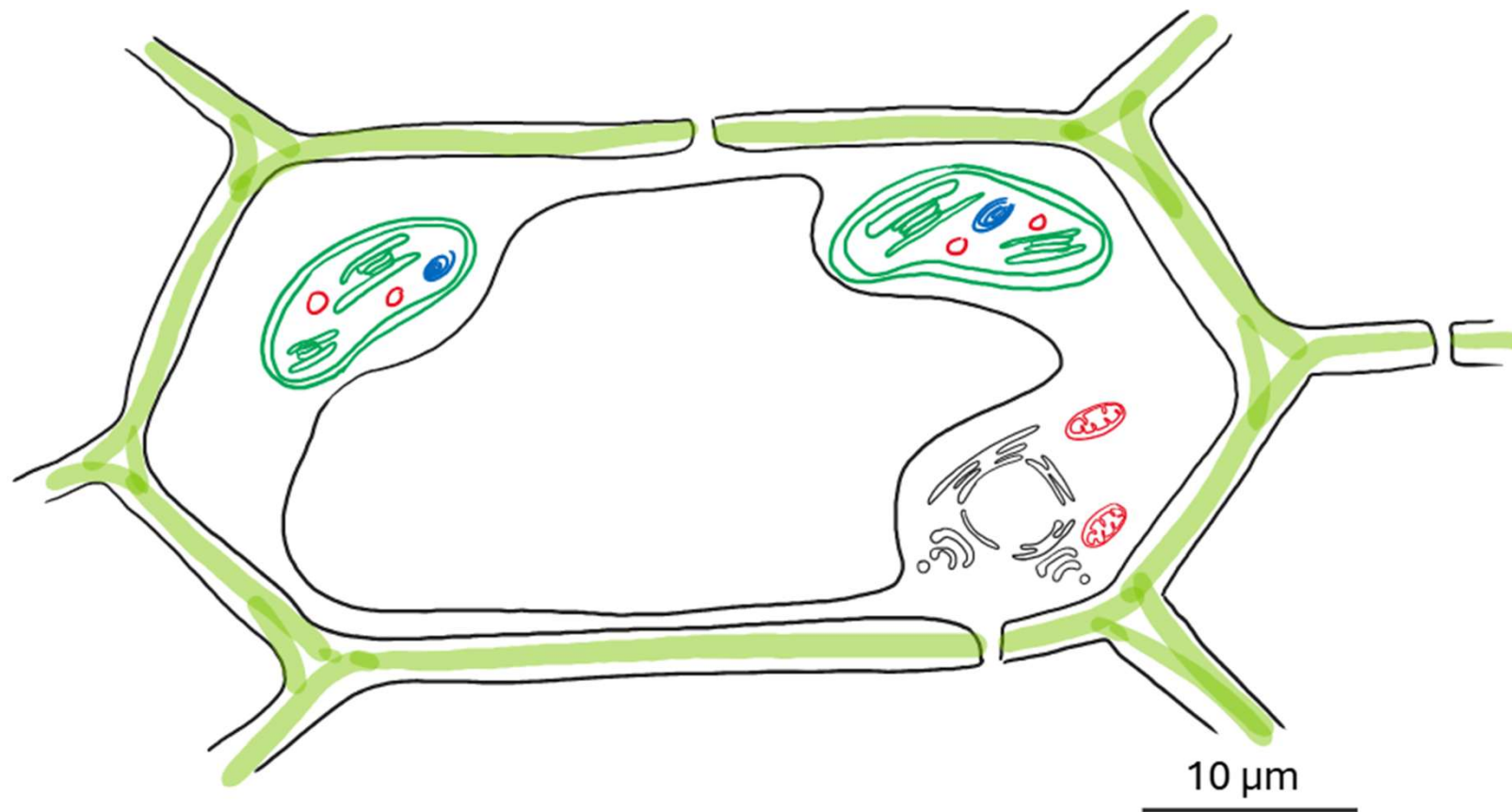
7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes

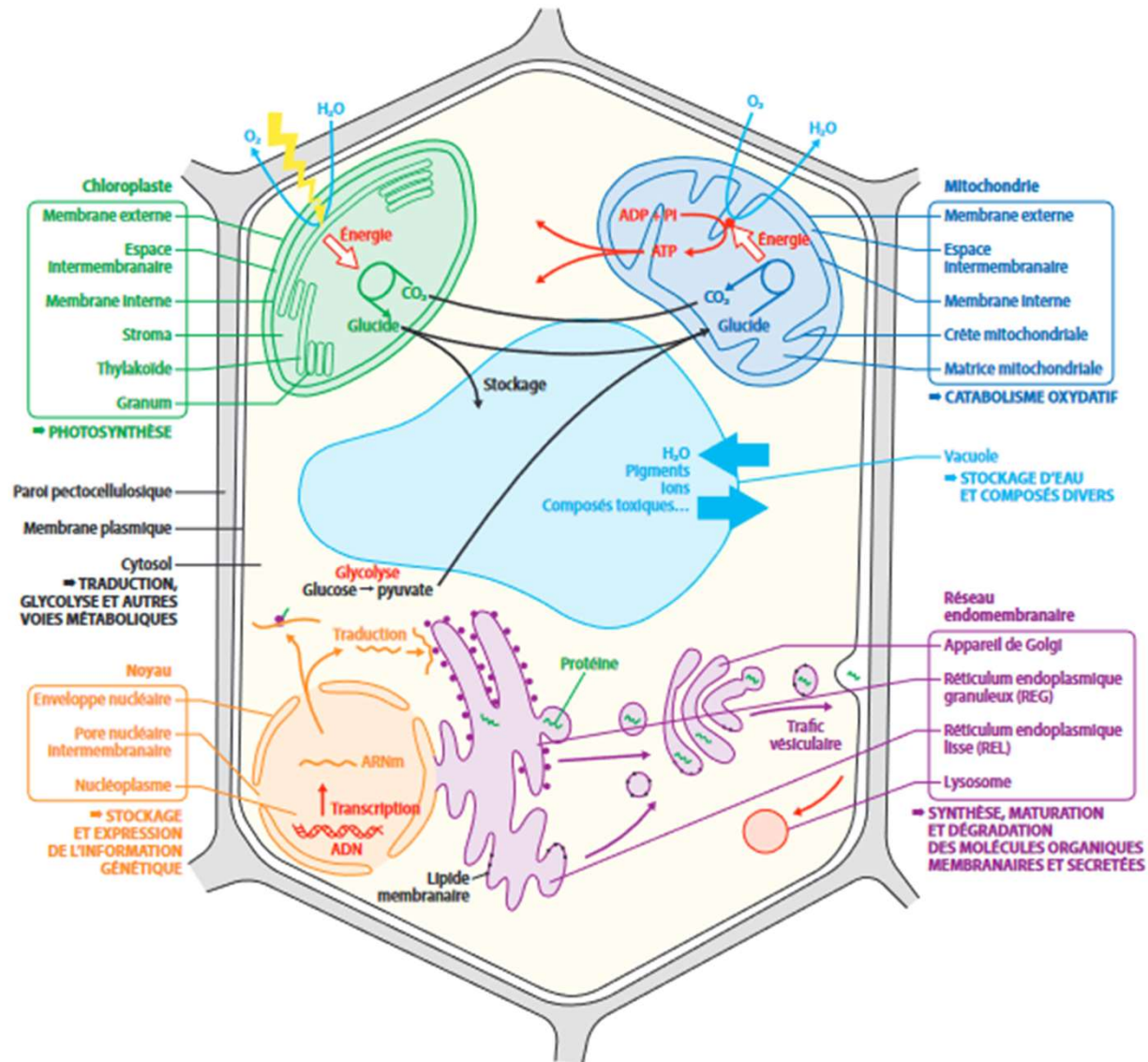
- chloroplastes issus d'un processus d'**endosymbiose** d'une bactérie proche des **cyanobactéries** actuelles
 - ⇒ **deux membranes** (cf clade de la Lignée verte)
 - ⇒ contiennent et expriment leur **propre ADN**
 - ⇒ se divisent indépendamment des cellules dans lesquelles ils se trouvent
- Chloroplastes = organites spécialisés dans la **photosynthèse** :
 - ✓ au sein des **thylakoïdes**, ensemble de sacculs parfois empilés en **grana**
 - ✓ **pigments** comme la **chlorophylle** absorbent la lumière et **convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique**
 - ✓ énergie chimique, sous forme d'ATP et de coenzymes réduits (NADPH, H^+)
 - ✓ ATP et coenzymes réduits (NADPH, H^+) = énergie chimique réinvestie dans **cycle de Calvin** → produit final = **phosphoglycéraldéhyde (G3P) = triose-phosphate**
 - ✓ Stockage du G3P sous forme **d'amidon**. L'amidon ensuite hydrolysé → glucose → catabolisme → ATP
- Cln: chloroplaste produit MO soit **stockée**, soit **exportée** hors de la cellule, soit **utilisée** pour produire d'autres molécules (ex : cellulose), soit **catabolisée** pour fournir de l'énergie à la cellule.
- Certains chloroplastes perdent leur fonction photosynthétique et accumulent des pigments rouges ou jaunes (**chromoplastes** des fruits ou des pétales), des protéines impliquées dans la photoperception (stigma des euglènes), ou stockent des molécules organiques de nature glucidique (**amyloplast** des fruits ou des organes de réserve).



7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes







► **Figure 6.8.** L'organisation générale de la cellule eucaryote végétale et les coopérations entre compartiments intracellulaires.

(in Vuibert)

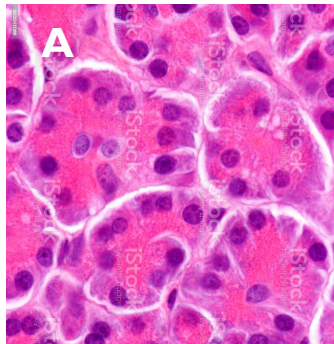
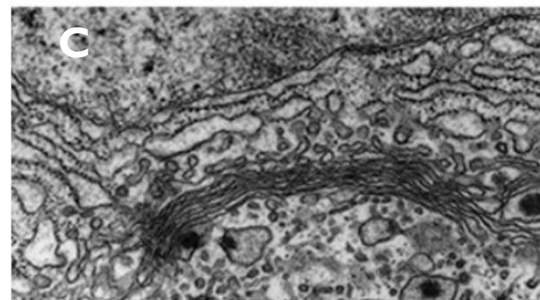
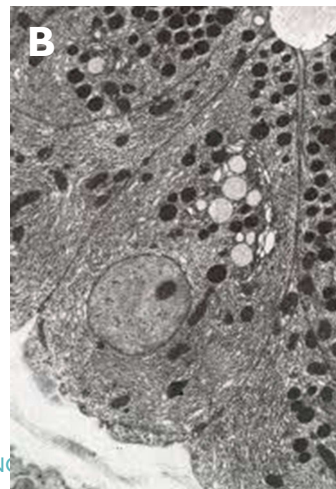
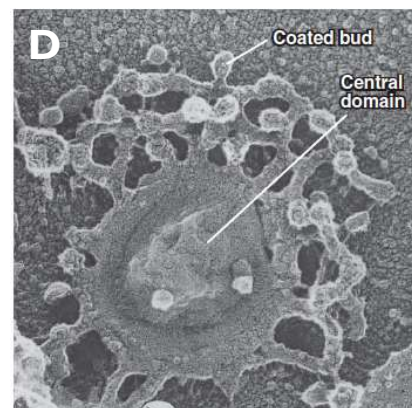
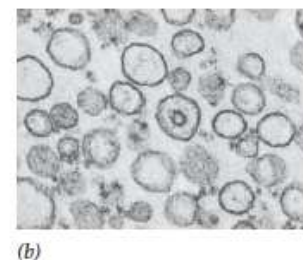
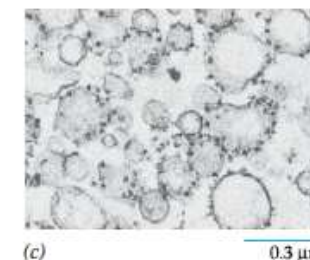


C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE

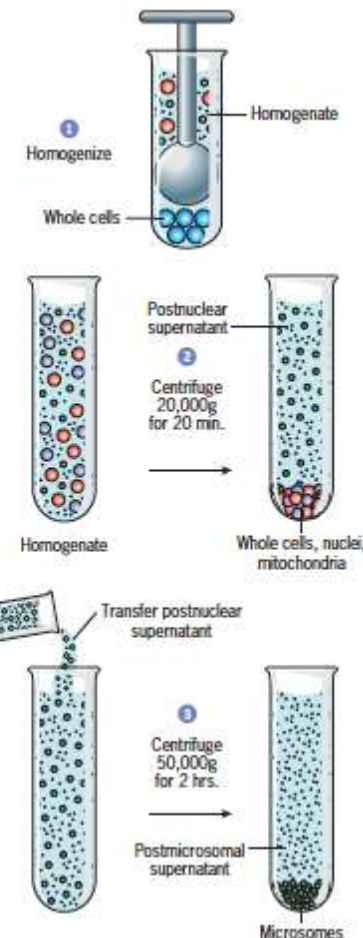
MISE EN ÉVIDENCE DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE (RAPPEL) ➤ Fractionnement cellulaire

- Observation au MO, MEB, MET

Cf.TP



Microsomes obtenus par fractionnement cellulaire

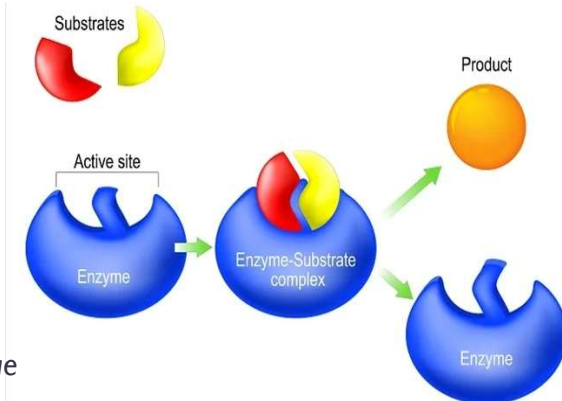


C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE

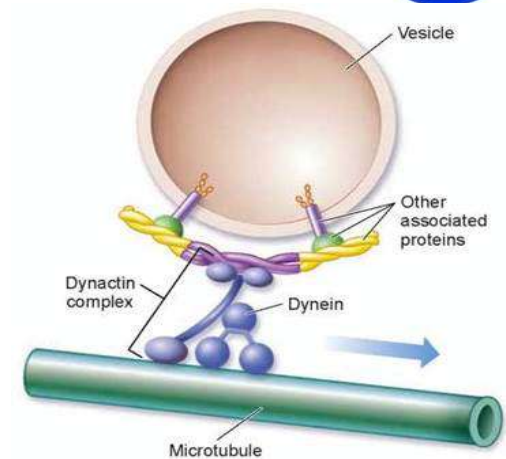
ANALYSE DE LA COMPARTIMENTATION DANS LE SYSTÈME EUCARYOTE

Avantages et inconvénients

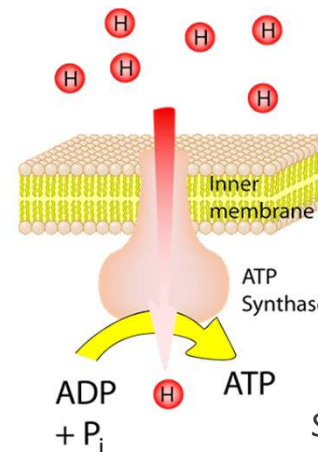
- **L'optimisation des processus enzymatiques**
 - Compartiments avec conditions physico-chimiques différentes
 - Rapprochement enzyme/substrat dans espace restreint → ↑ vitesse
 - Spécialisation enzymatique des compartiments → ↑ efficacité
- **La protection**
 - Protection du génome : noyau
 - Protection de la cellule vis-à-vis de molécules dangereuses (O_2 , ROS, enzymes protéolytiques) : vésicules, lysosomes, peroxysomes
- **L'optimisation de l'adressage**
 - Transport par vésicules et adressage → optimisation et contrôles (mais coûts énergétiques)
 - Maturation et adressage des protéines via voie endomembranaire → diversification des devenir (mais ralentissement de la synthèse)
- **La mise en place de gradients de concentration ionique : source d'énergie**
 - Gradients de H^+ → Synthèse d'ATP ; transports transmembranaires actifs secondaires
 - Gradients de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} → rôle dans la communication



Réaction enzymatique



Transport vésiculaire



Synthèse d'ATP

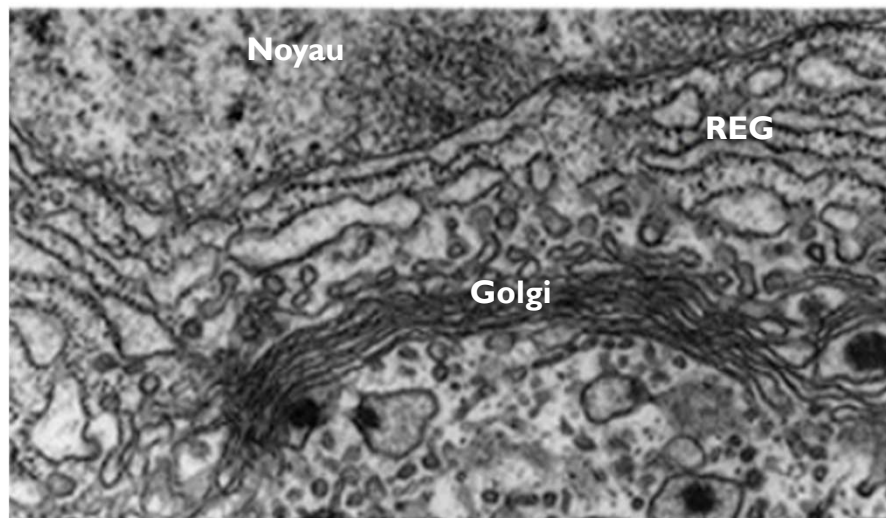
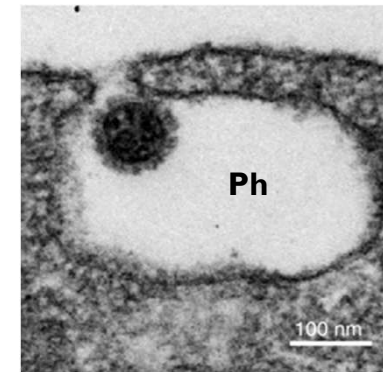
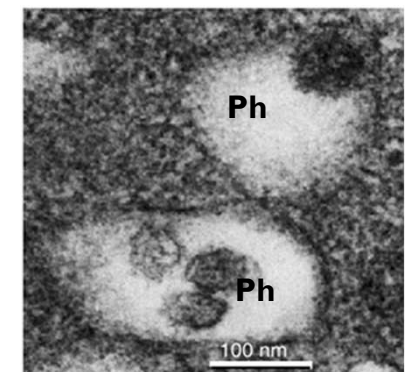
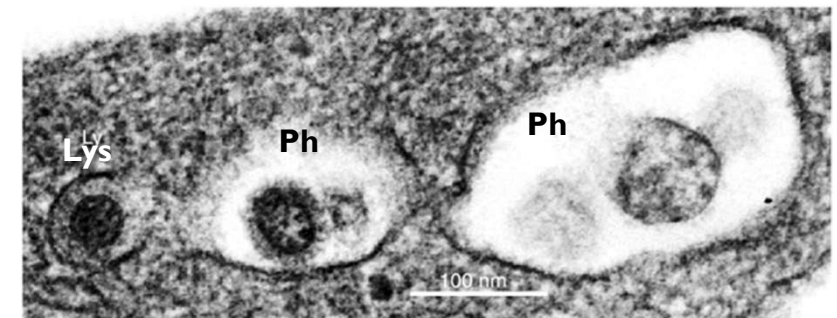
C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE

ANALYSE DE LA COMPARTIMENTATION DANS LE SYSTÈME EUCARYOTE



Coopération

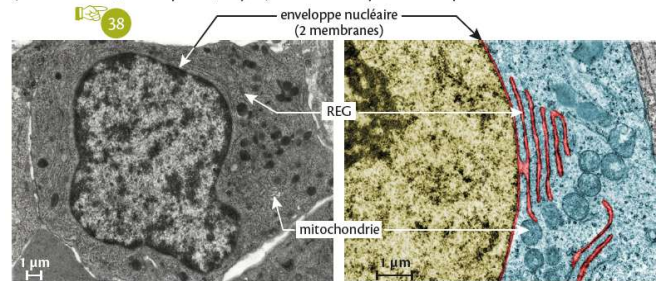
- Coopération entre certains compartiments pour de nombreux processus
 - Cas de la synthèse protéique (noyau – RE – Golgi)
 - Cas de la phagocytose (lysosome – phagosome)
 - Cas des protéines mitochondriales (mitochondrie – noyau)
 - Cas du chloroplaste-vacuole (stockage de MO, équilibre hydrique)



C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE

Isolés par une membrane ou une enveloppe

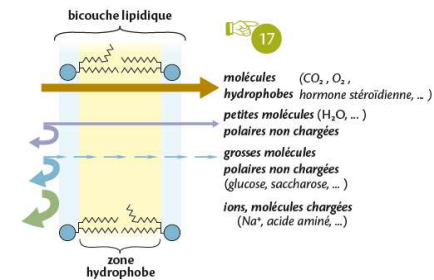
La **microscopie électronique à transmission** distingue compartiments à enveloppe (mitochondrie, chloroplaste, noyau) ou délimités par une simple membrane.



La membrane nucléaire externe est en continuité avec le réticulum.

Échangeant de manière contrôlée

La bicouche lipidique est une **barrière imperméable** à la plupart des solutés. La présence de **protéines** ou de **pores** est indispensable.



★ Des compartiments aux fonctions spécifiques

Des organites spécialisés dans quelques fonctions

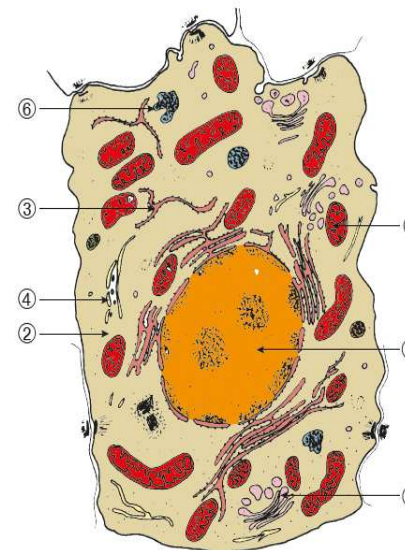
Les compartiments peuvent **protéger** (ADN dans le noyau), **isoler** (enzymes lysosomiales), **stocker** (Ca^{2+} , saccharose).

⚠ Le type d'organites et leur quantité informent sur la **spécialisation cellulaire**. Une cellule spécialisée dans la synthèse de protéines sécrétées a un grand nucléole et une grande richesse en REG, appareil de Golgi, vésicules de sécrétions, mitochondries, ...

Un cytosol, siège de nombreux processus cellulaires

Abritant de nombreuses **voies métaboliques**, il est à la fois un compartiment de **synthèse** et de **recyclage**. Chez la plupart des **cellules procaryotes**, c'est le seul compartiment.

⚠ Conséquence de leur compartimentation, la **taille des cellules eucaryotes** est **supérieure** à celle des cellules procaryotes.



compartiments de synthèse

- ① NOYAU (synthèse ADN + ARN)
- ② CYTOSOL (synthèse de protéines, de glucides + rôles multiples)
- ③ REG (synthèse de protéines)
- ④ REL (synthèse des lipides + citerne à Ca^{2+})
- ⑤ GOLGI (synthèse de glucides + maturation des protéines)

compartiments de dégradation

- ⑥ LYSOSOME
- ⑦ PEROXYSOME

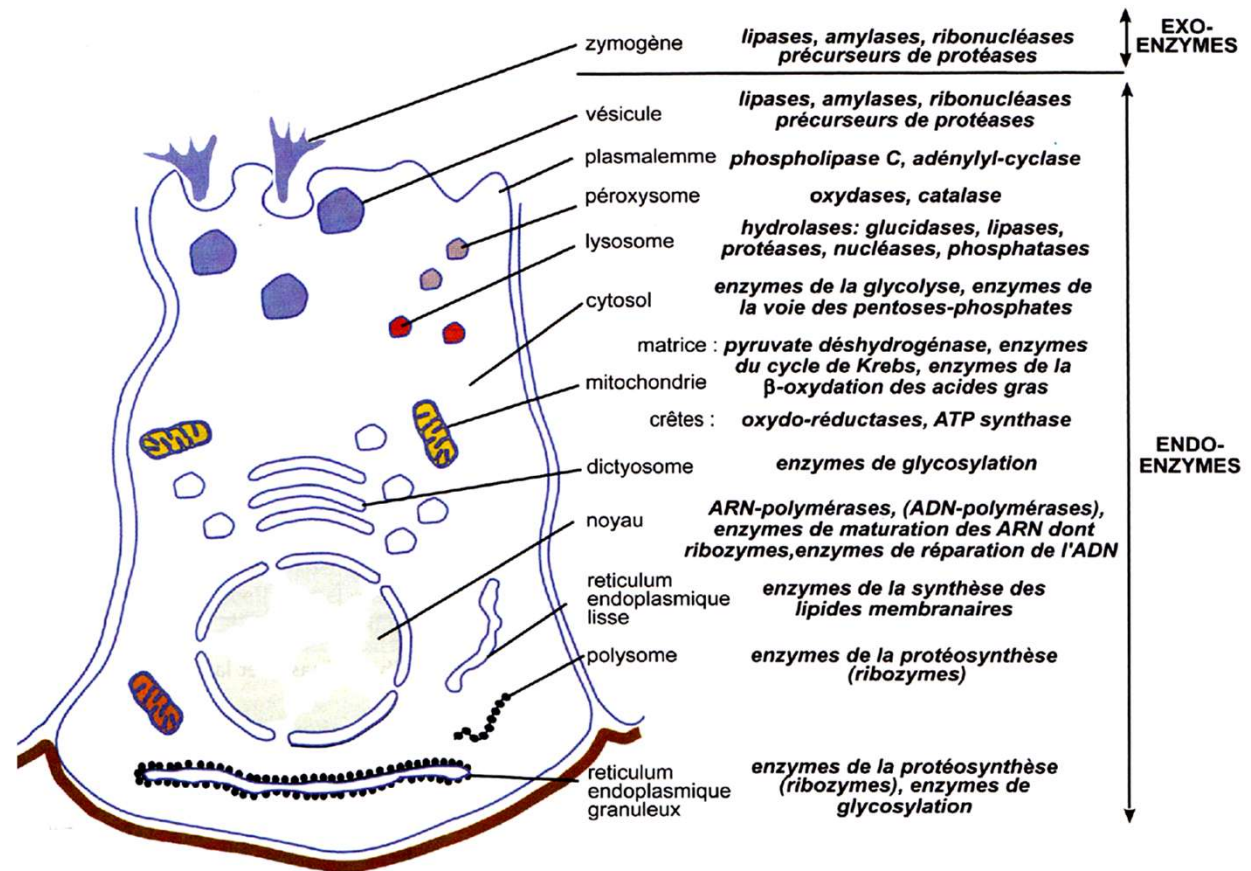
compartiments énergétiques

- ⑧ MITOCHONDRIES

(source Aurélie Denis)

C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE: EXEMPLE DES ENZYMES

- Certaines **enzymes** sont **confinées** dans tel ou tel **compartiment** subcellulaire (cytosol, noyau, mitochondrie, REG...) ou dans une **membrane**.
- Cette distribution subcellulaire des enzymes est contrôlée par des **signaux d'adressage**.
- L'action de ces enzymes est donc **contrôlée** et limitée **spatialement**.
- Chaque compartiment endomembranaire possède ainsi ses propres enzymes et ne peut donc réaliser que certains types de réactions biochimiques → **spécialisation fonctionnelle**
 - ✓ Ex : Le noyau comporte les enzymes de la réplication et de la transcription.
 - ✓ Ex : La mitochondrie contient, entre autres, les enzymes du catabolisme oxydatif aérobie.



Répartition des principales enzymes de la CAP

C. CONSÉQUENCES DE LA COMPARTIMENTATION CELLULAIRE:

★ Des réactions qui dépendent de la nature des enzymes présentes

Des réactions accélérées par la haute concentration en enzymes et les conditions physico-chimiques du compartiment  28

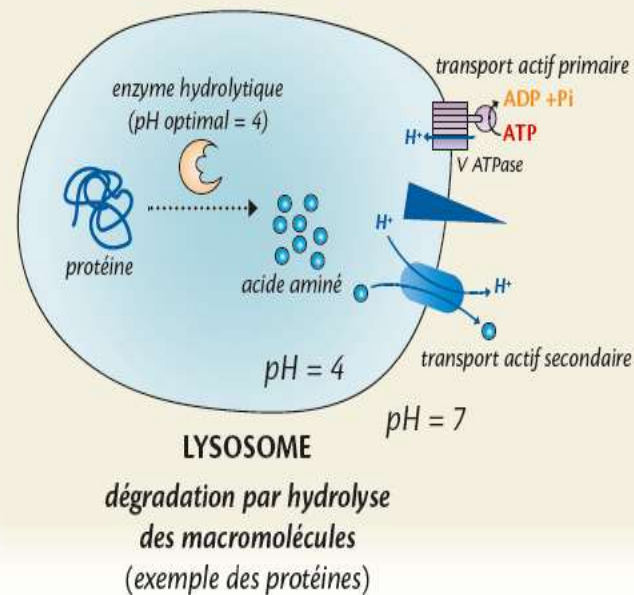
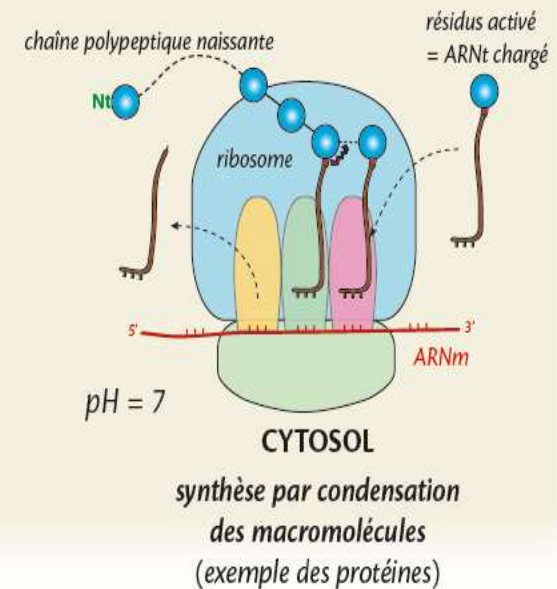
- ♦ **Peroxisome** : compartiment d'**oxydation** (détoxication et dégradation de substances) avec **peroxydases** et **oxydases** si abondantes qu'elles peuvent précipiter en un cristal protéique.
- ♦ **Lysosome** : compartiment d'**hydrolyse** contenant plusieurs types d'hydrolases (lipases, nucléases, protéases) actives à pH acide (sauvegarde des constituants cellulaires).

Des compartiments séparés permettant des réactions antagonistes

Le **cytosol** abrite la **traduction** qui procède d'une **condensation** d'acides aminés pouvant provenir du **lysosome**, siège de la **réaction antagoniste**.



Des protéines de transport assurent des échanges de différents types et permettent le recyclage.



(source Aurélie Denis)

SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule

PLAN DU COURS

I. Les cellules : des unités autonomes plus ou moins compartimentées délimitées par une membrane plasmique

- A. Les cellules procaryotes : des cellules peu ou pas compartimentées délimitées par une ou deux membranes
 - 1. Organisation d'une cellule procaryote : exemple des bactéries
 - 2. Une compartimentation possible associée à une régionalisation du fonctionnement cellulaire
- B. Les cellules eucaryotes : des cellules compartimentées
 - 1. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique
 - 2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire
 - 3. Les lysosomes
 - 4. Les peroxysomes
 - 5. Les vacuoles
 - 6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif
 - 7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes
- C. Conséquences de la compartimentation cellulaire

II. Le cytosquelette : armature protéique de la cellule impliquée dans sa structure et sa dynamique

A. Les éléments du cytosquelette chez les cellules eucaryotes

- 1. Les microfilaments d'actine
- 2. Les filaments intermédiaires
- 3. Les microtubules
- 4. L'importance du cytosquelette dans la migration des cellules animales

B. Des protéines homologues au cytosquelette eucaryote chez les bactéries

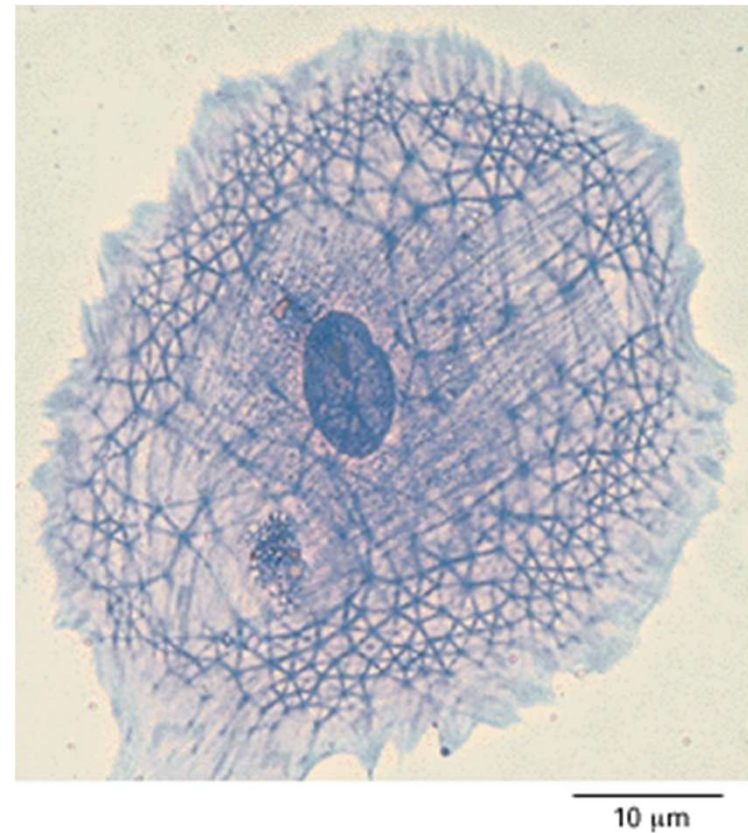
III. Les cellules : des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux

- A. Des flux de matière
- B. Des flux d'information
- C. Des flux d'énergie

II. LE CYTOSQUELETTE : ARMATURE PROTEIQUE DE LA CELLULE IMPLIQUEE DANS SA STRUCTURE ET SA DYNAMIQUE

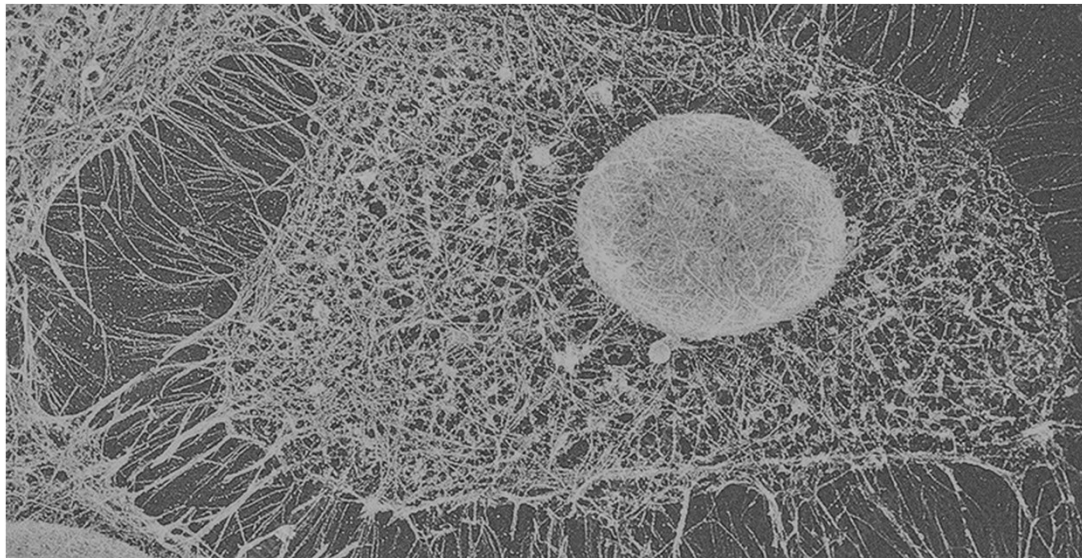
A. LES ELEMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

Cellule en culture fixée et colorée au bleu de Coomassie, un colorant des protéines. Noter la variété des structures filamenteuses à travers la totalité du cytoplasme.



II. LE CYTOSQUELETTE : ARMATURE PROTEIQUE DE LA CELLULE IMPLIQUEE DANS SA STRUCTURE ET SA DYNAMIQUE

INTRODUCTION

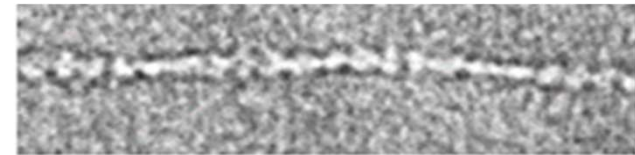


Cytosquelette d'une cellule épithéliale humaine (MET, x3 000)

- Le cytoplasme des cellules est parcouru de **protéines fibreuses, insolubles**, appelées filaments
- Il confère au cytoplasme sa structure de gel
- On distingue **3 types de filaments** selon leur taille

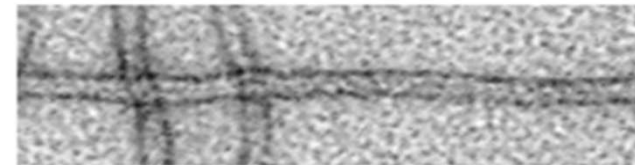
BCPST I - ENCPB - S. DALAINE

Hyaloplasme* : n.m. (*hyalos-* : cristal, *-plasme* : transparent) ensemble formé par le cytosol et les protéines fibrillaires du cytosquelette



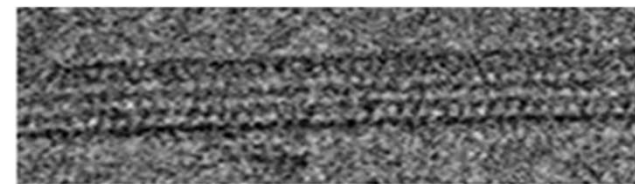
8 nm

Microfilaments



12 nm

Filaments Intermédiaires



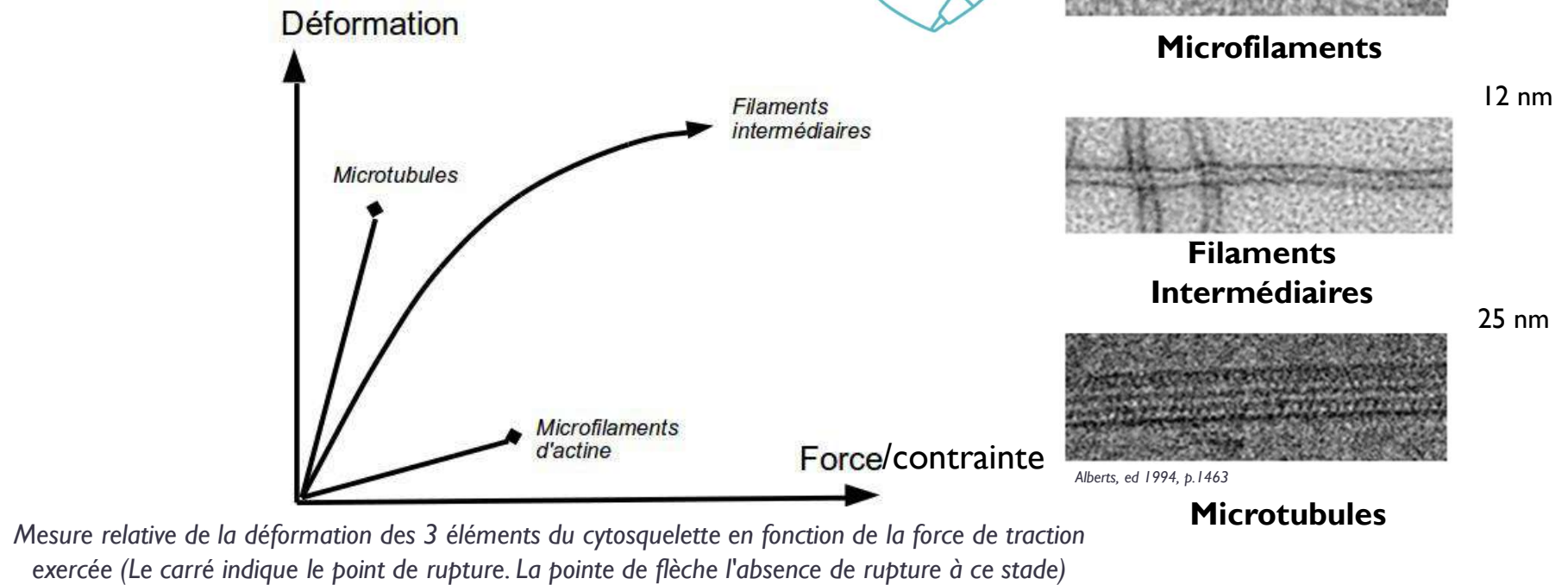
25 nm

Alberts, ed 1994, p.1463

Microtubules

II. LE CYTOSQUELETTE : ARMATURE PROTEIQUE DE LA CELLULE IMPLIQUEE DANS SA STRUCTURE ET SA DYNAMIQUE

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES



1. Comparer la résistance à l'étirement des éléments du cytosquelette.
2. Proposer une explication à cette différence de résistance, à partir de l'observation de la structure moléculaire de ces protéines.

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Structure et localisation

- **Diamètre : 7-8 nm**

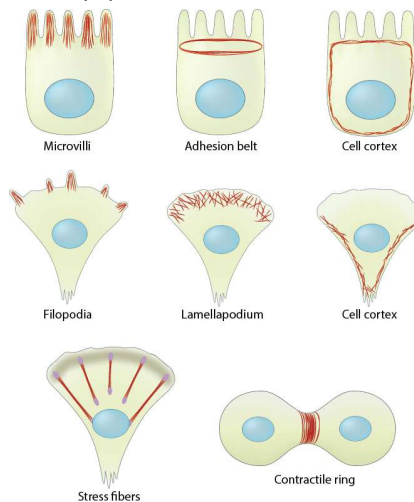
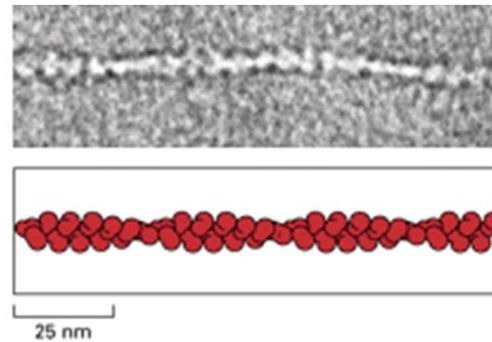


- **Structure :**

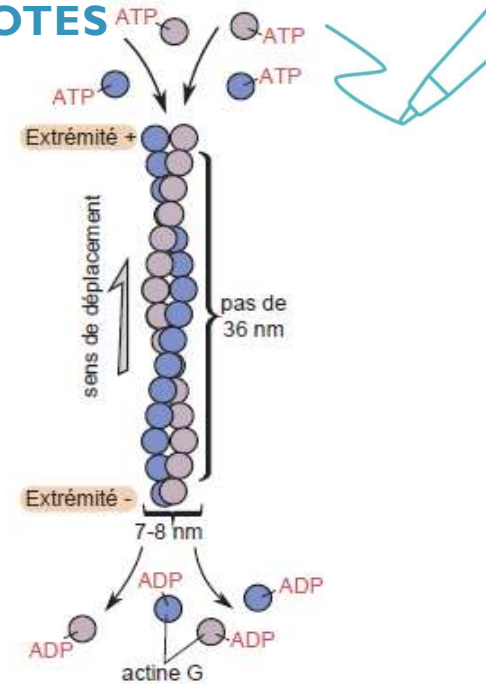
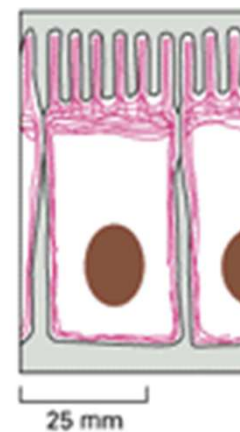
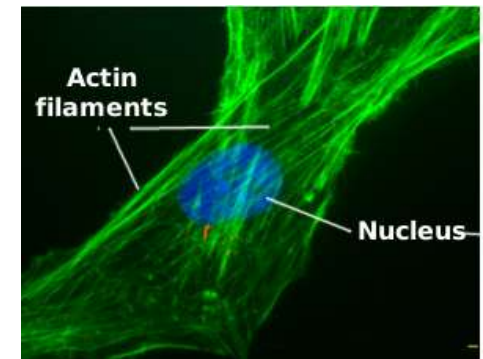
- L'**actine G (globulaire)** associée à l'**ATP** polymérise sous forme d'**actine F (fibreuse)**
- 2 polymères d'actine enroulés
- polarisée : extrémité pointue (-) et barbée (+)
- flexible
- dynamique

- **Localisation :**

- dispersées dans la cellule
- concentrées sous la membrane plasmique
- Ancrage à la membrane (jonction adhérente, contacts focaux)



MF : observation au MET et schéma

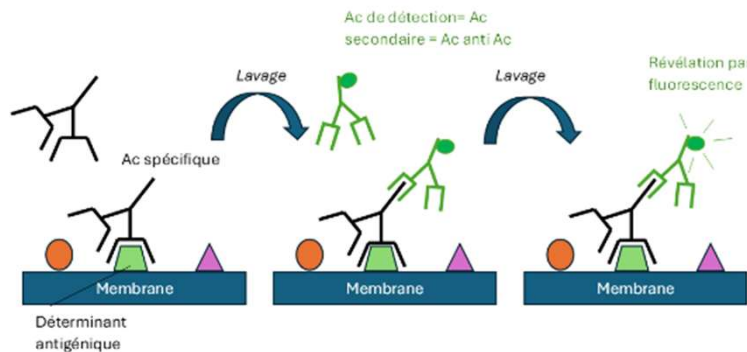
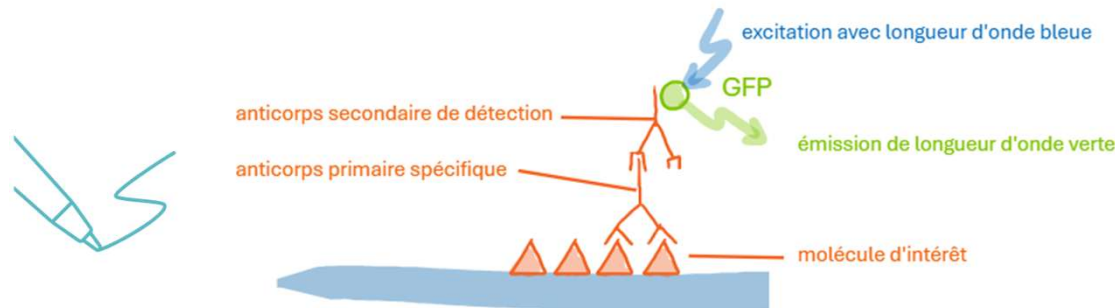


Immunocytochimie (immunohistochimie)

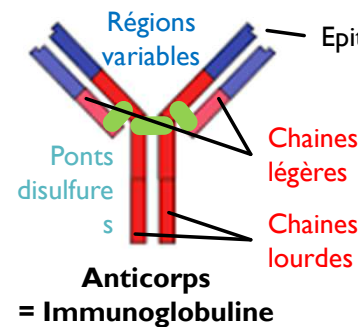
Principe : utiliser des anticorps (Ac) dirigés contre une structure cellulaire spécifique ciblée (Ag) et marqués (fluorescence, enzyme, radioisotope)

→ Observation au microscope

- ✓ Méthode directe (anticorps marqué)
- ✓ Méthode indirecte (+ anticorps anti-anticorps marqué)



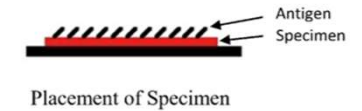
Principe de l'immunocytochimie



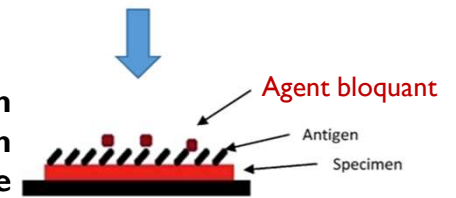
Etapes

1. Préparation de l'échantillon

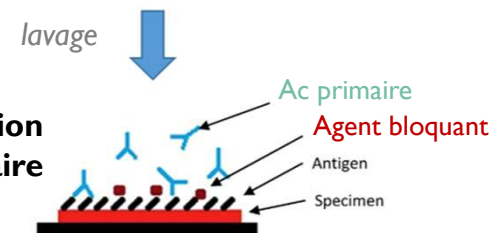
Fixation + coupe fine ou frottis



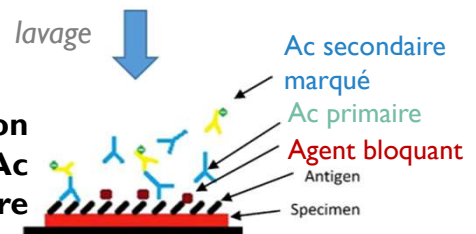
2. Incubation dans la solution bloquante



3. Incubation avec Ac primaire



4. Incubation avec Ac secondaire



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

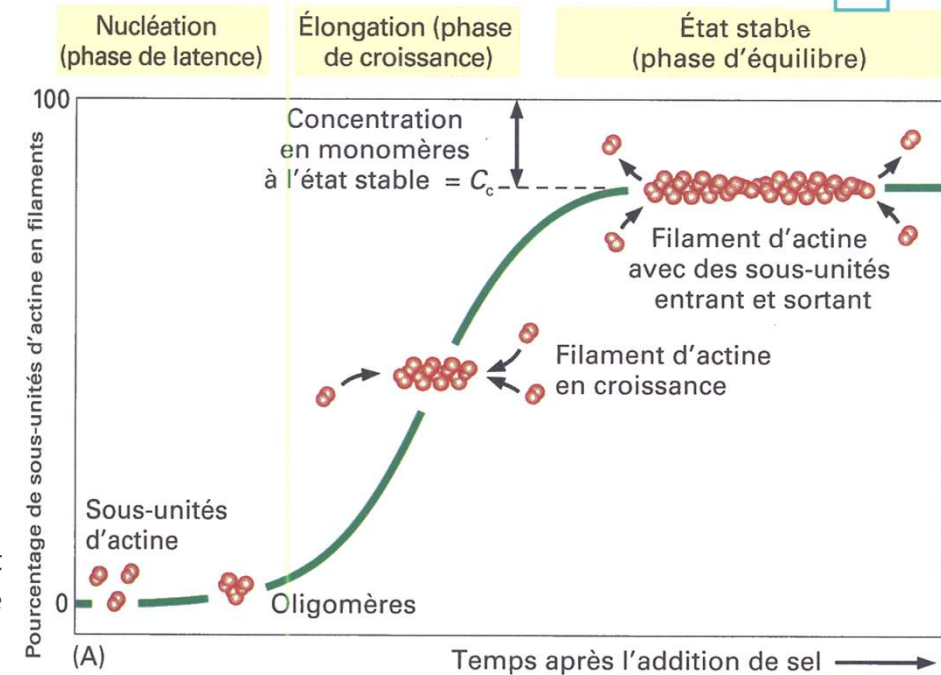
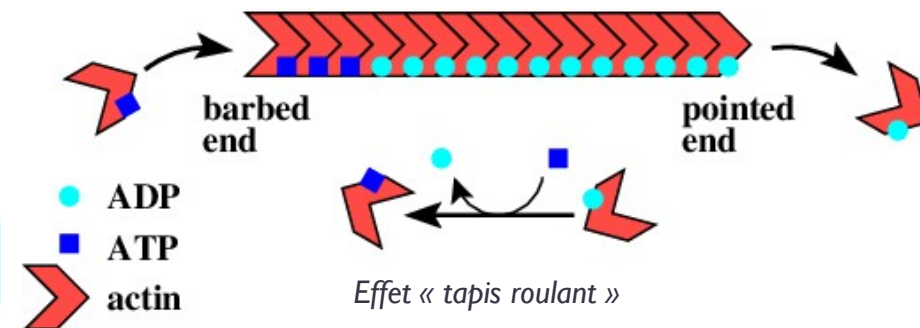
I. Les microfilaments (d'actine)

Dynamique

- Les filaments d'actine (actine F) se polymérisent et se dépolymérisent spontanément en fonction de la [Actine G-ATP]
- Nécessité d'un centre de **nucléation** pour démarrer la polymérisation → cf. protéines associées aux microfilaments
- **Polymérisation plus rapide à l'extrémité (+)**
- La dépolymérisation est favorisée par l'hydrolyse de l'ATP
- Pour une certaine [Actine G] → état stationnaire = **effet tapis roulant**

→ Les microfilaments sont des structures très dynamiques qui se renouvellent rapidement

→ Adaptation du réseau d'actine aux besoins de la cellule

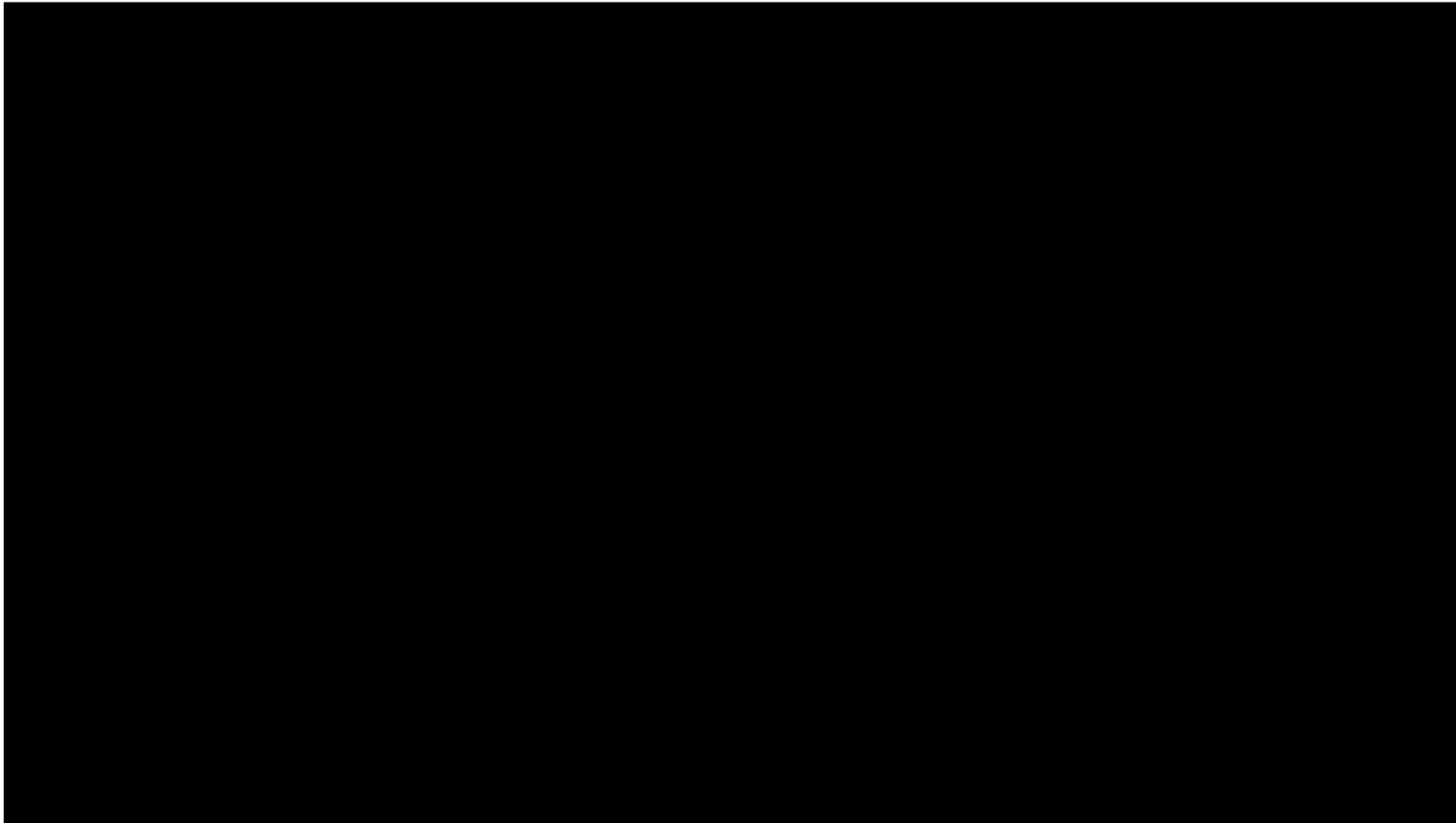


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Dynamique

https://www.youtube.com/watch?v=VVgXDW_804U



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Les protéines associées aux microfilaments

- Diverses protéines s'associent aux microfilaments et contrôlent leur dynamique :

➤ protéines de piégeage

Ex : profiline

➤ protéines de stabilisation

Ex : tropomyosine

➤ protéines de fragmentation

Ex : gelsoline

➤ protéines de réticulation

Ex : filamine

➤ protéines d'ancrage

Ex : spectrine

➤ des protéines de pontage (MF parallèles → faisceau)

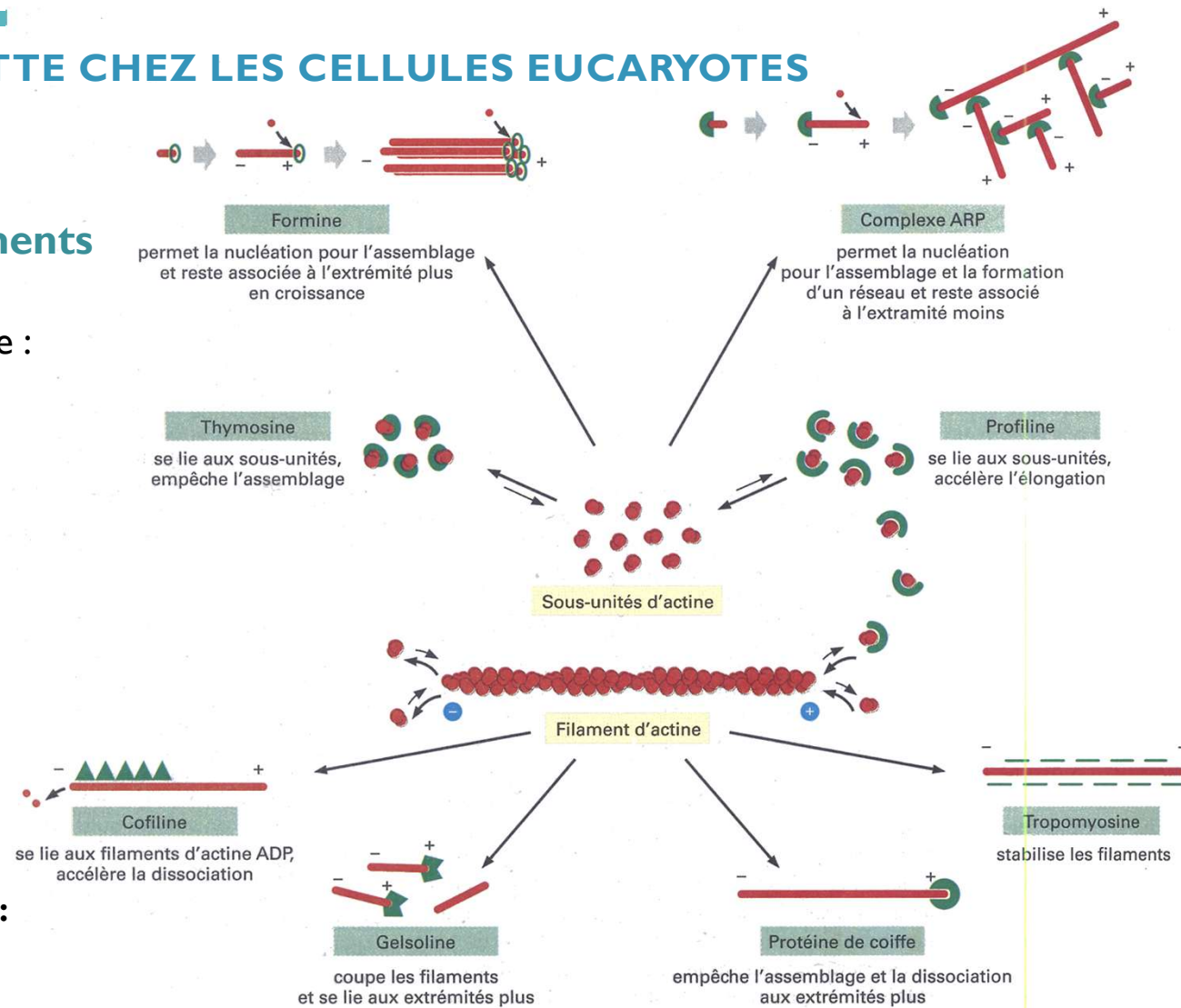
Ex : alpha-actinine.

➤ des protéines assurant les déplacements :

Ex : les myosines



Cf. cell muscul striée

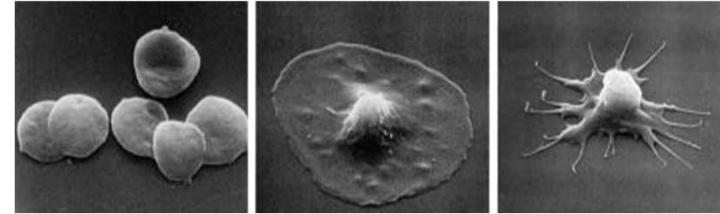


Les protéines associées aux microfilaments et leurs fonctions

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Filaments d'actine et forme cellulaire (plaquettes, MEB)

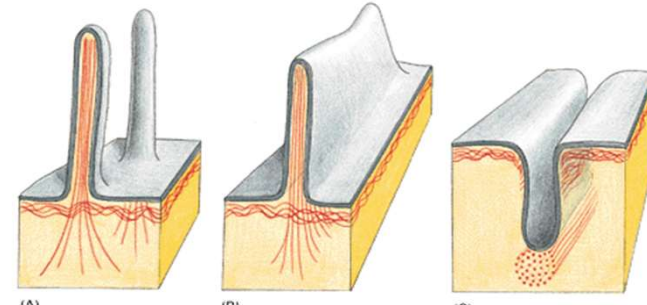


Fonctions (I/2)

- **Forme** de la membrane et de la cellule

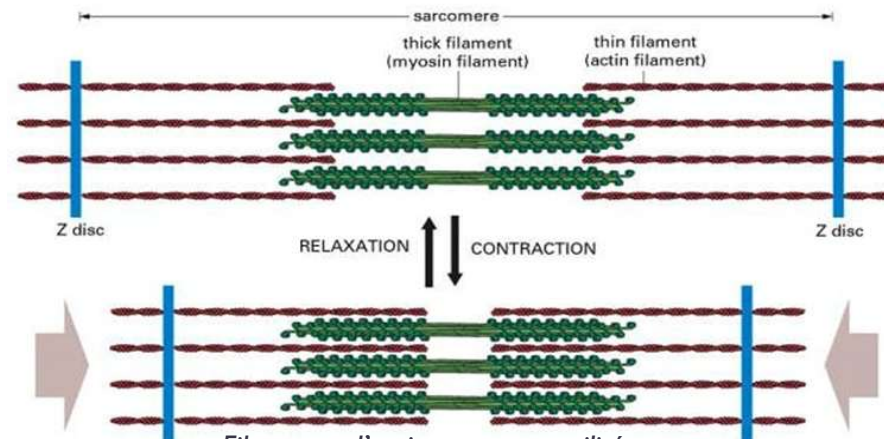
Cortex cytosolique

Filaments d'actine et forme de la membrane



- **Mouvements intracellulaires**

- Transport de molécules et vésicules près de la mb plasm
- Contractilité – en association avec la **myosine**
 - ✓ Ex: contraction musculaire
 - ✓ Ex: Anneau de constriction lors des divisions cellulaires



Filaments d'actine et contractilité

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES



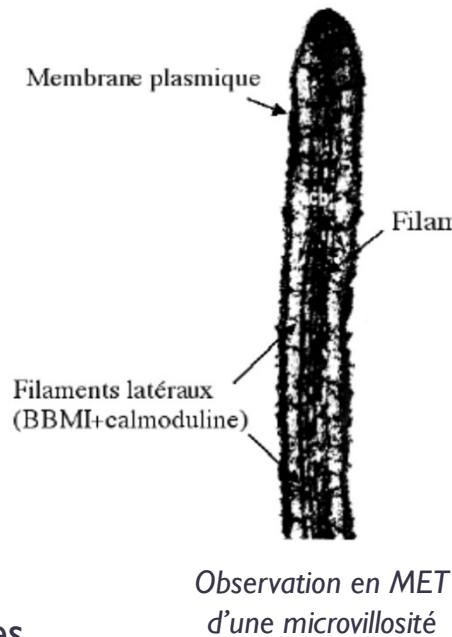
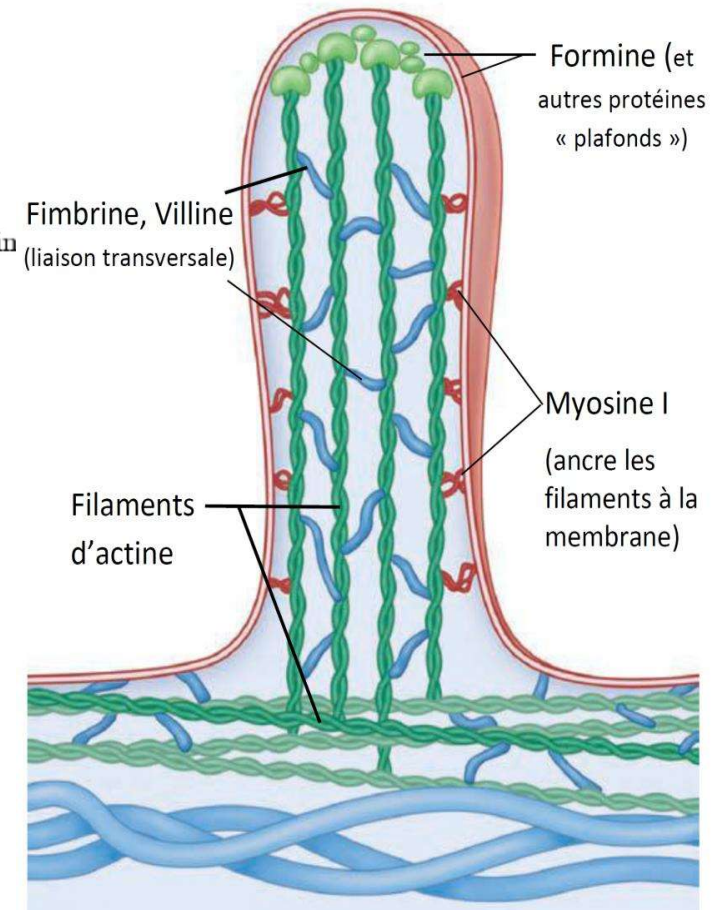
I. Les microfilaments (d'actine)

Fonctions (1/2)

- **Forme** de la membrane et de la cellule

Cortex cytosolique

- Microvillosité: armature permise par les microfilaments d'actine en faisceaux parallèles + protéines de pontage, la fimbrine + liaison à la membrane grâce à la myosine



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Fonctions (1/3)

- Migrations cellulaires = **motilité**
 - Déplacement amiboïde : formation de filopode, lamellipode (pseudopode): association actine et filamine
 - Mode de déplacement des amibes, macrophages

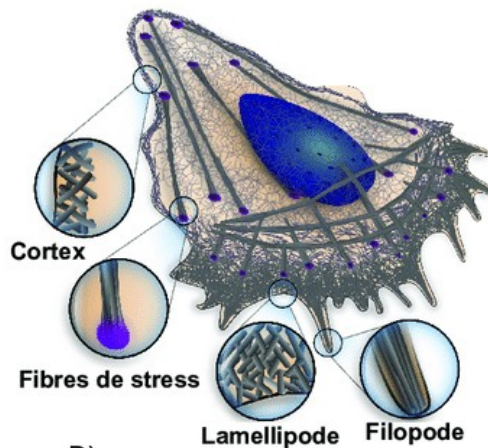


T=0

T=15 s

T=30 s

Suivi du déplacement d'une cellule d'épiderme de poisson (MO contraste de phase)



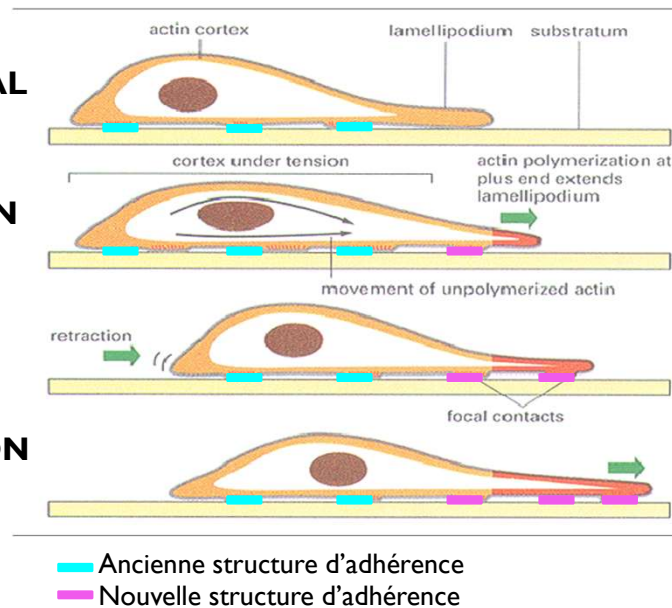
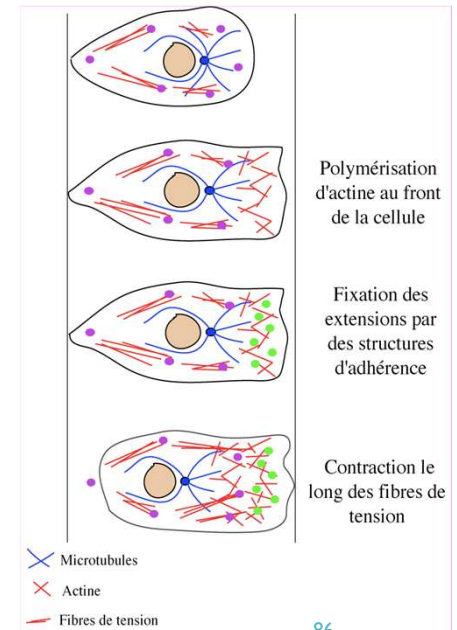
Filaments d'actine et motricité cellulaire
(filopode et lamellipode)

ÉTAT INITIAL

EXTENSION

FIXATION

RÉTRACTION



Filaments d'actine et motricité cellulaire

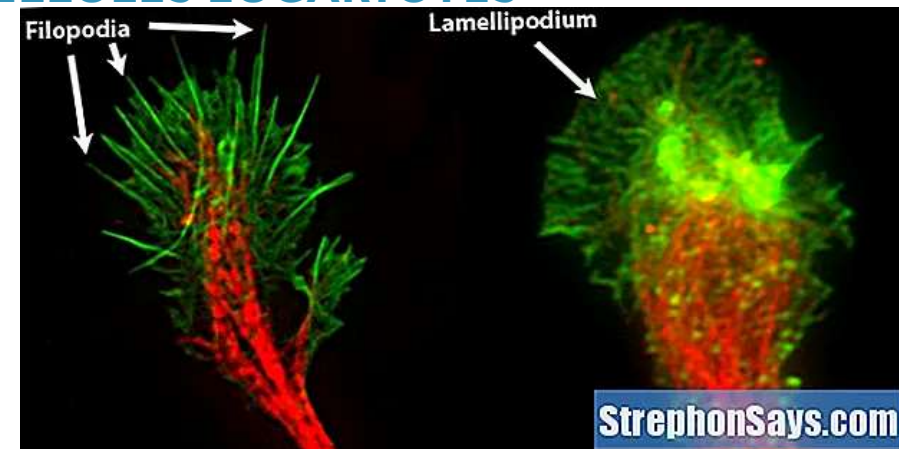
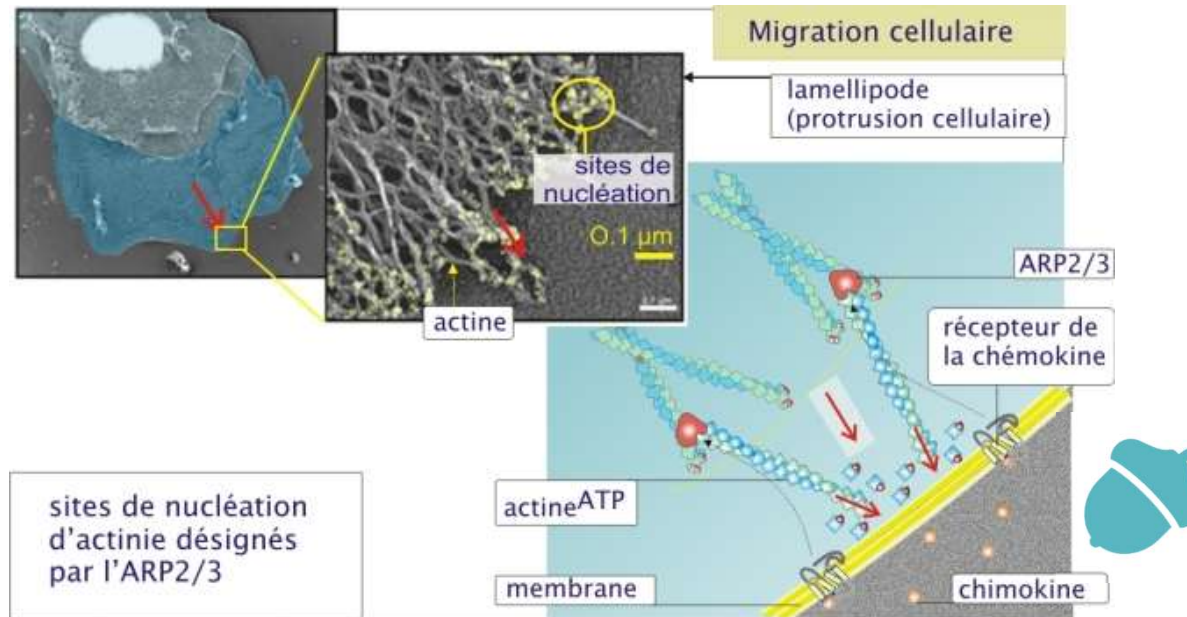


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

I. Les microfilaments (d'actine)

Fonctions (2/3)

- Migrations cellulaires = **motilité**
 - Déplacement amiboïde : formation de filopode, lamellipode (pseudopode): association actine et filamine
 - Mode de déplacement des amibes, macrophages



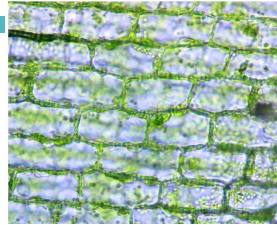
Filaments d'actine et motricité cellulaire

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

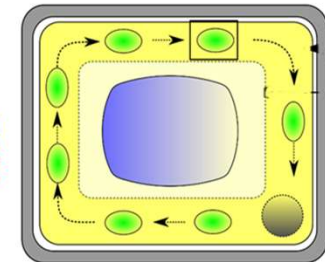
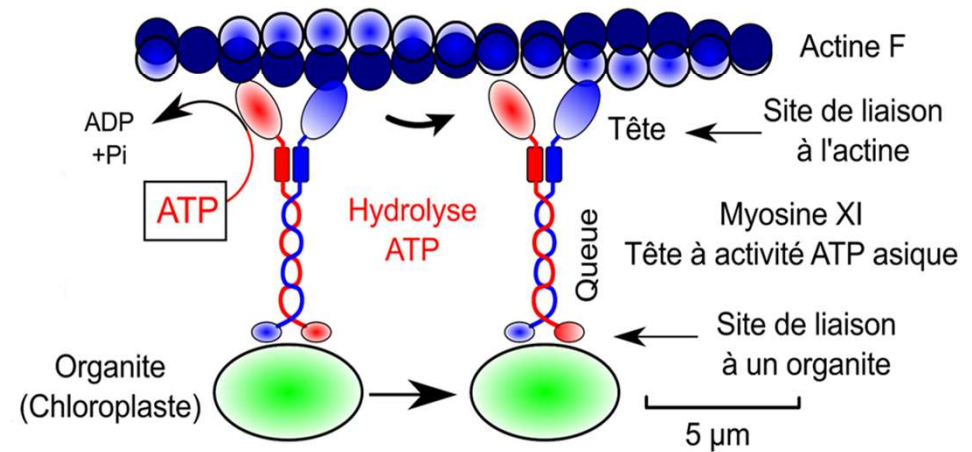
I. Les microfilaments (d'actine)

Fonctions (3/3)

- Mouvements intracellulaires
 - Transport de molécules et vésicules près de la membrane plasmique
 - Contractilité – en association avec la myosine
 - ✓ Ex: contraction musculaire
 - ✓ Ex: Anneau de constriction lors des divisions cellulaires

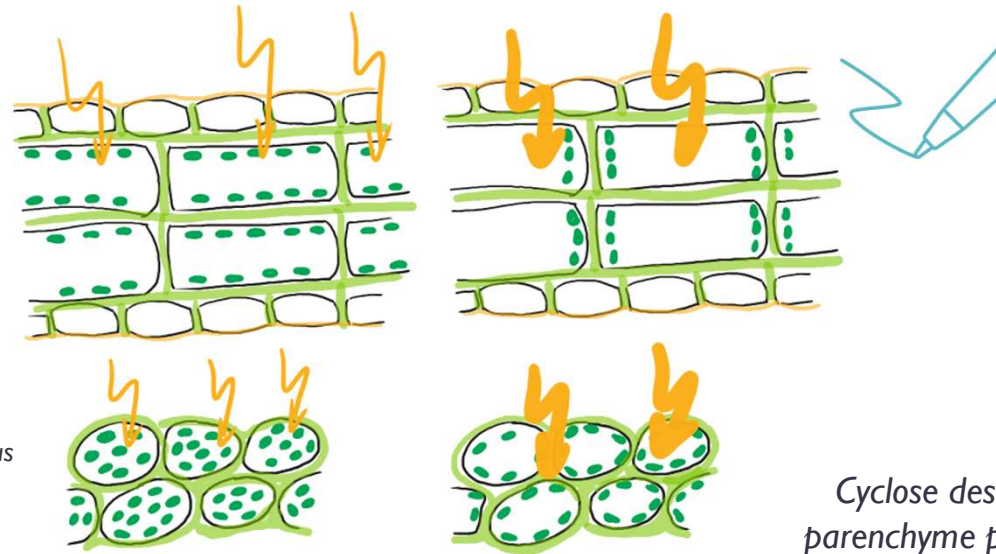


Cellule chlorophyllienne éclairée



Cyclose des chloroplastes dans une cellule du parenchyme palissadique

Cyclose des chloroplastes dans une cellule du parenchyme palissadique (en éclaircissement faible à gauche et en éclaircissement fort à droite)

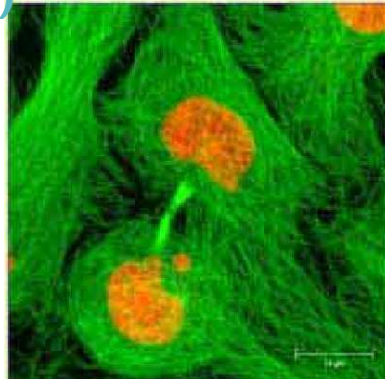
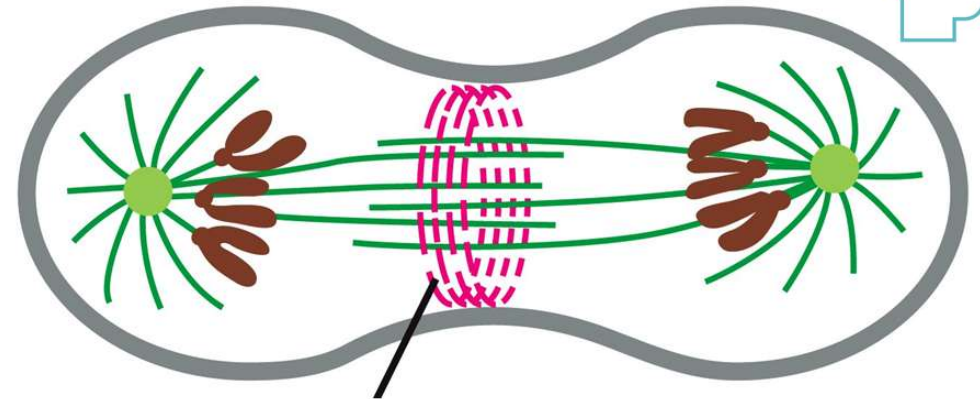


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

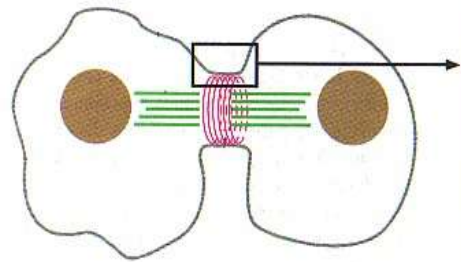
I. Les microfilaments (d'actine)

Fonctions (3/3)

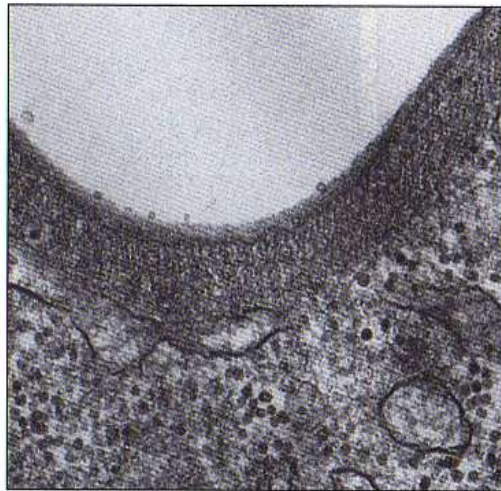
- Constriction et formation du corps intermédiaire lors de la télophase.



FILAMENT D'ACTINE ET MYOSINE
DE L'ANNEAU CONTRACTILE.

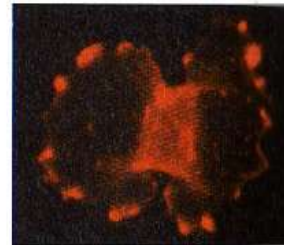


(A)



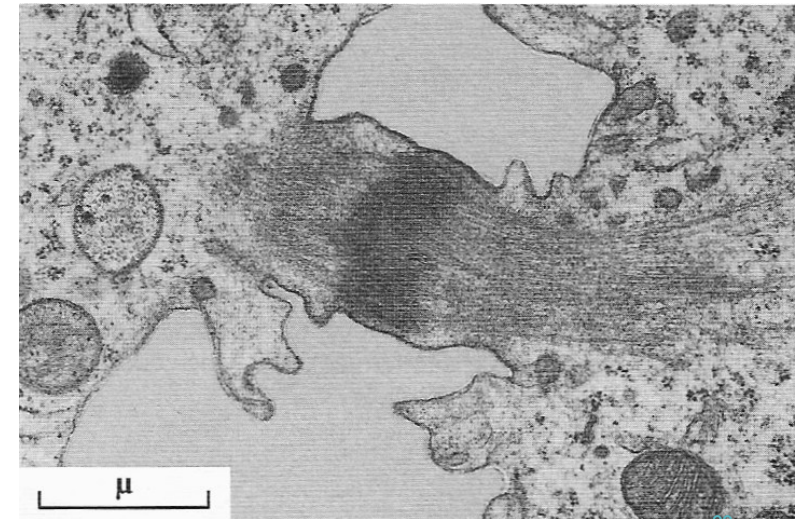
(B)

0,5 µm



(C)

10 µm



Anneau contractile d'*actine* *myosine*, en télophase: cytokinèse.

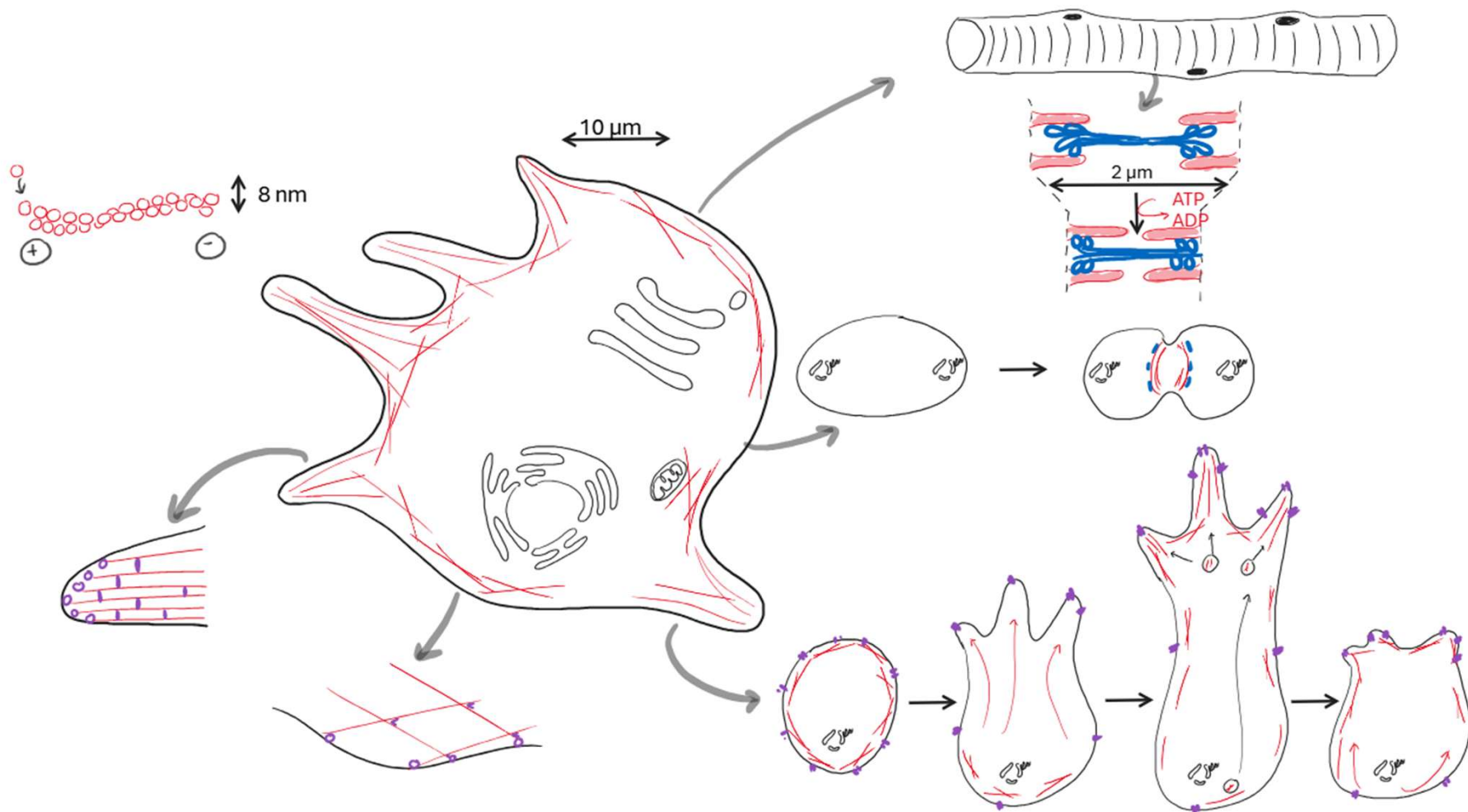
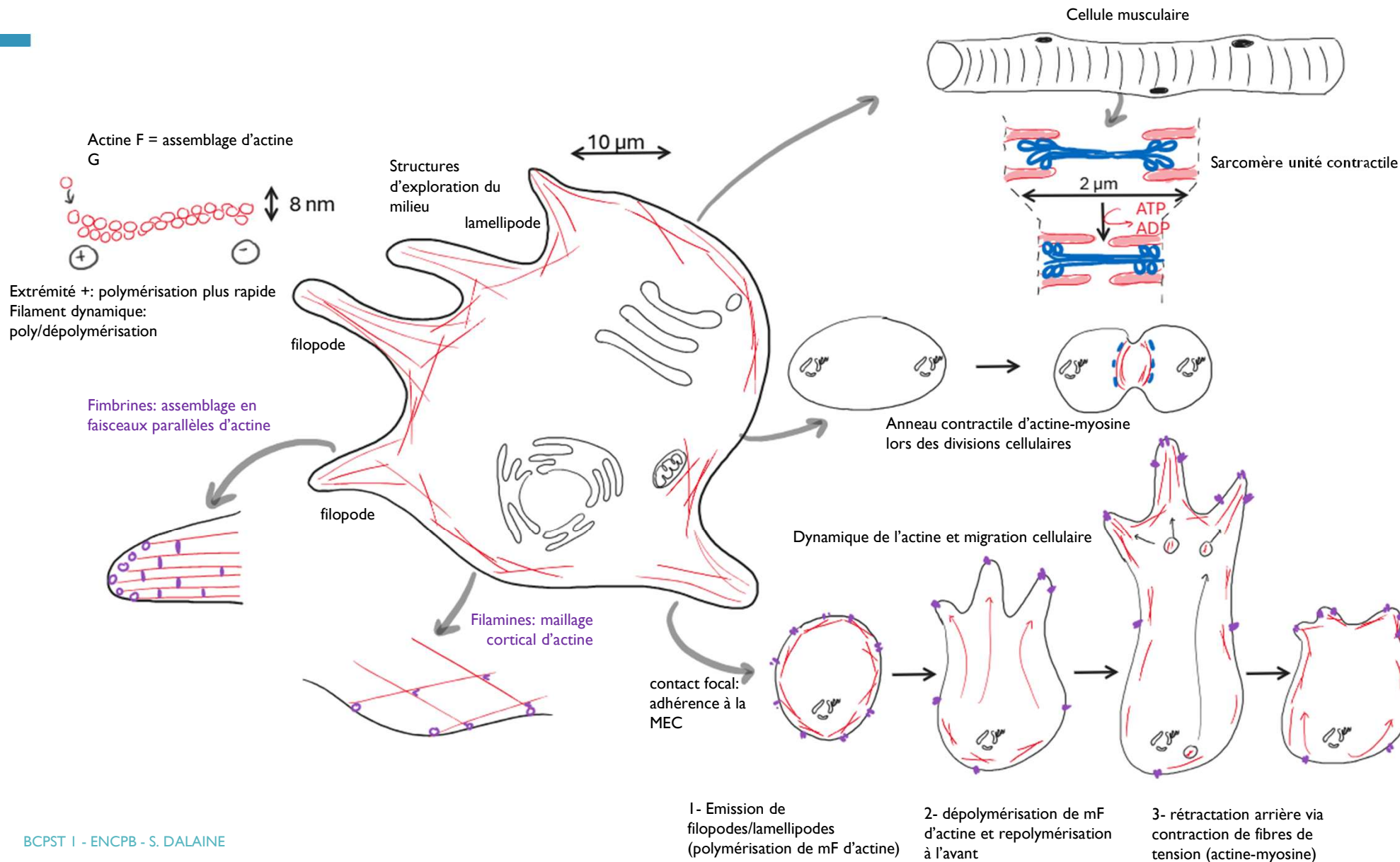


Schéma bilan: le microfilament d'actine dans une cellule de type fibroblaste ou myocyte

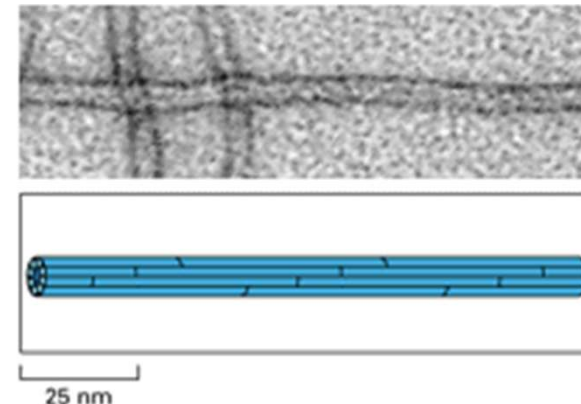


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

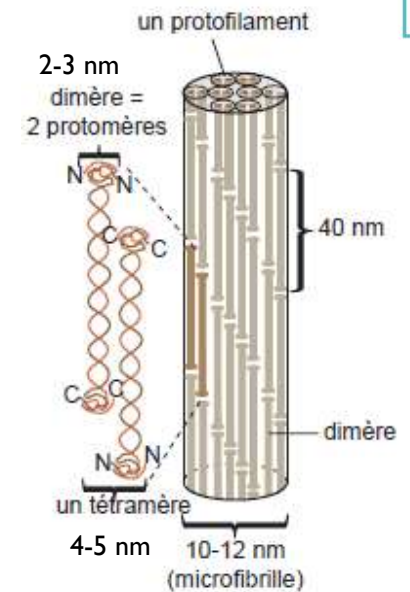
2. Les filaments intermédiaires

Structure et localisation

- **Diamètre : 10-12 nm**
- **Structure :**
 - Famille (nature) hétérogène mais structures **polycaténaires** semblables
 - **Stable** et **résistante à la tension**
 - **Non polarisée**
- **Localisation :**
 - Distribués dans la cellule, rayonnants de l'enveloppe nucléaire à la MP
 - Ancrage à la membrane (desmosomes, hémidesmosomes)
 - Principalement dans cellules **animales différenciées**, ne se divisant plus



FI : observation au MET et schéma

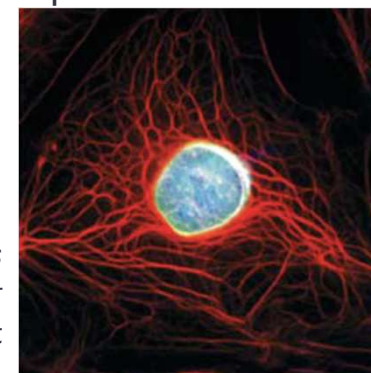
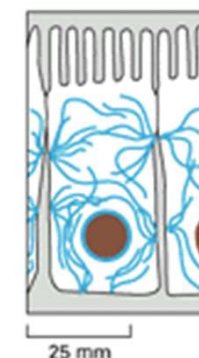


Structure des filaments intermédiaires

Types	Protéines	Localisation
I et II	Kératines	Cell épithéliale
III	Desmines	Cell musculaire
IV	Neurofilaments	Neurone
V	Lamines	Noyau

Exemples de filaments intermédiaires

Localisation des filaments intermédiaires (**kératines**, **lamines**) par marquage immuno-fluorescent

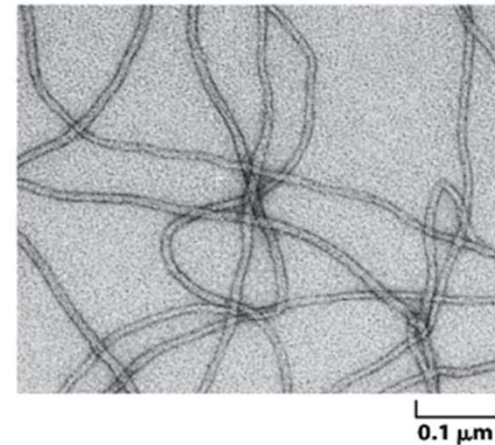
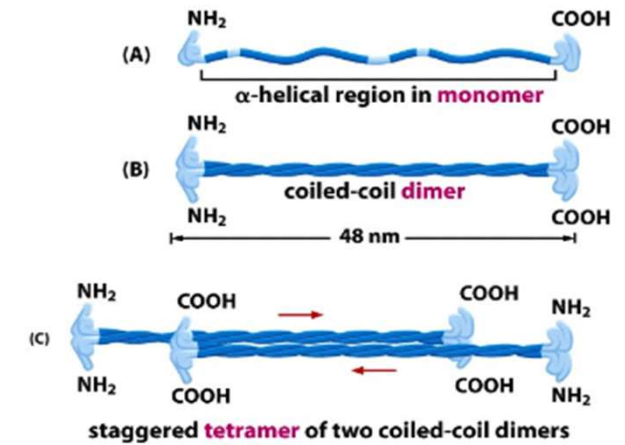
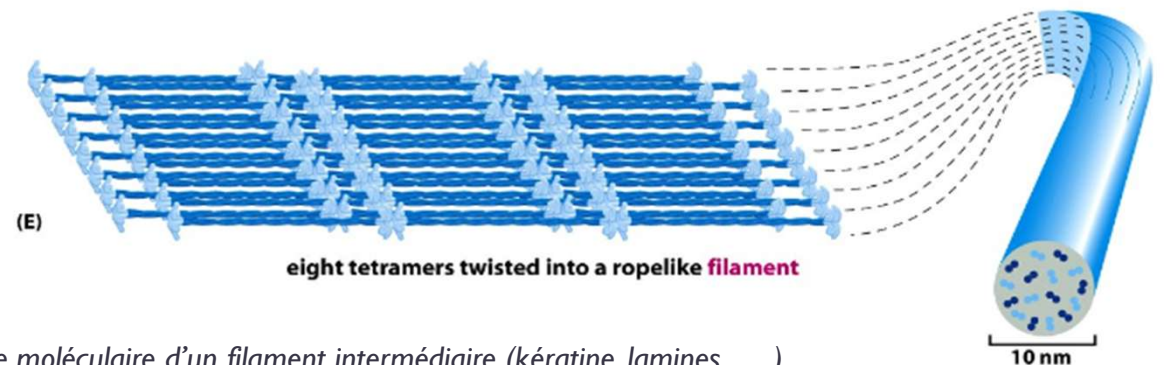


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

2. Les filaments intermédiaires

Structure

- Constituants de base = **protéines fibreuses**
- **Protéines** associées en dimère par coiled-coil (2 hélices alpha super enroulées)
- Association de **tétramères** → protofilament,
- 8 protofilaments → filaments



Structure moléculaire d'un filament intermédiaire (kératine, lamines, ...)

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

2. Les filaments intermédiaires

Dynamique

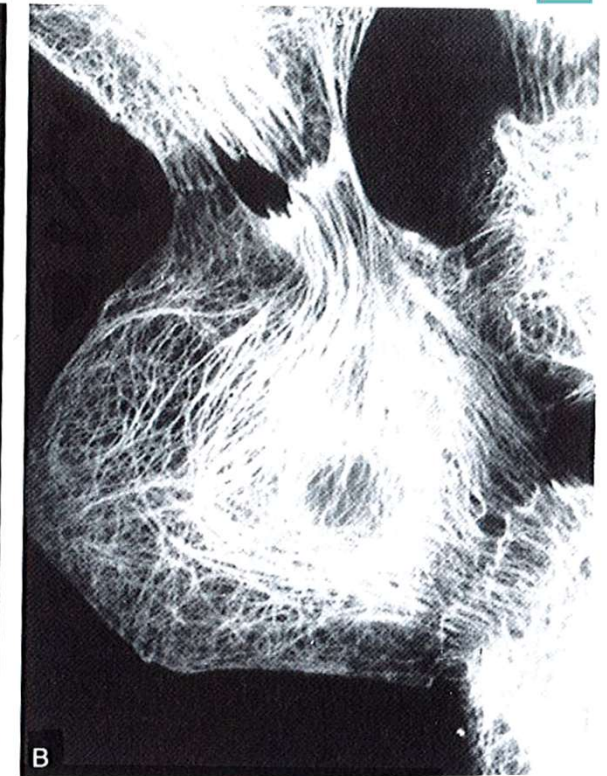
- Filaments intermédiaires = les plus **stables** des filaments du cytosquelette
- Certaine dynamique mais très différente de celle de l'actine

✓ *Ex : déstabilisation des lamines pendant la mitose*

→ Les filaments intermédiaires **présentent une certaine dynamique par incorporation distribuée le long des filaments (≠ aux extrémités)**



Injection de kératine marquée
→ localisation par immunofluorescence
(anticorps anti kératine marqués à la
fluorescence) après 20 min



localisation de la kératine par
immunofluorescence
Observation de cellules épithéliales soumises à divers
traitements au MO à fluorescence

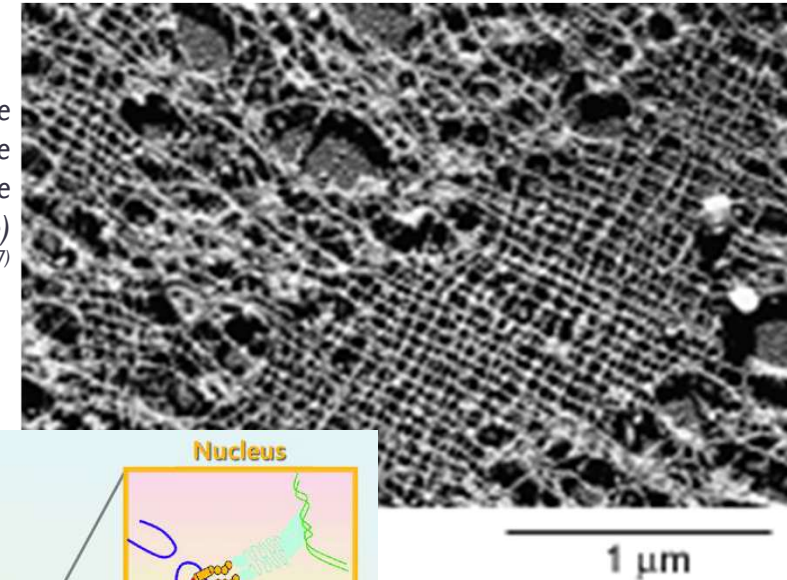
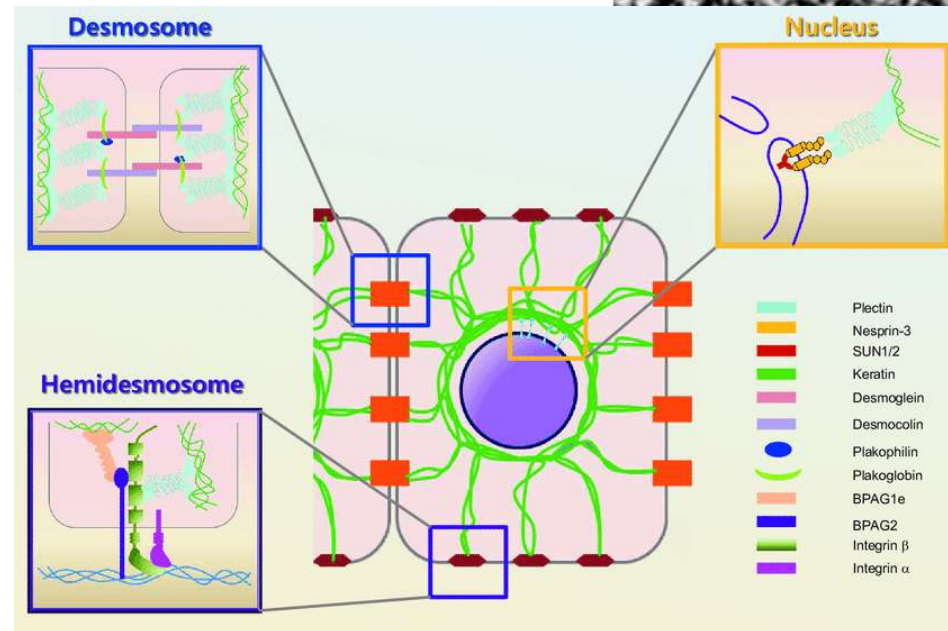
A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

2. Les filaments intermédiaires

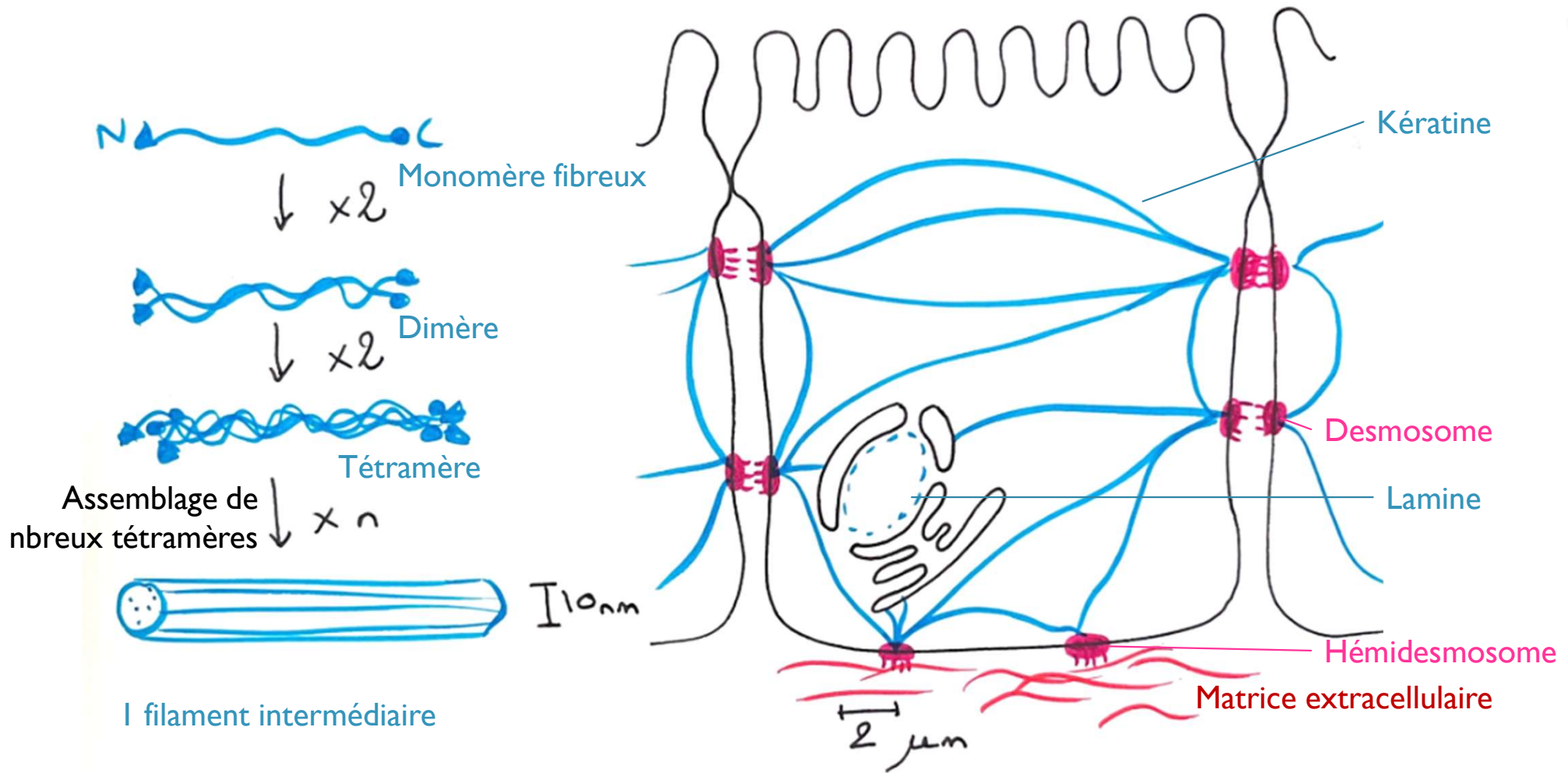
Fonctions

- **Forme et soutien** de la cellule et du noyau (ex lamine)
- **Cohésion cellulaire et résistance mécanique** dans les jonctions adhérentes (desmosomes)

Enveloppe nucléaire tapissée de **lamina interne** chez un ovocyte de Xénope
(MEB, cryofracture et ombrage)
(Alberts, ed 1994; p. 1047)



La kératine dans la cellule épithéliale



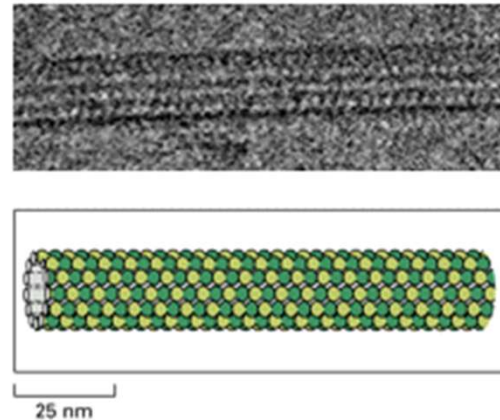
A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

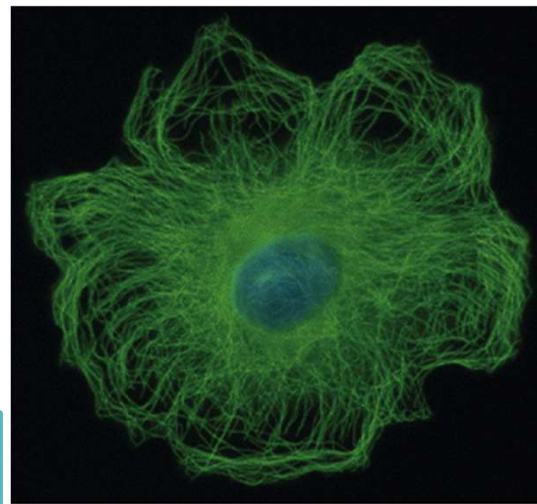
Structure et localisation

- **Diamètre** : 25 nm
- **Structure** :
 - Cylindre creux
 - **Hétérodimères** de tubuline
 - ✓ α , liée irréversiblement à GTP
 - ✓ β , lié réversiblement à GTP
 - Hétérodimère > **protofilament x13** > MT
 - **polarisée : extrémité +/-**
 - dynamique
- **Localisation** :
 - Rayonnant depuis le **MTOC***
 - Parallèle aux cils, flagelles, axones

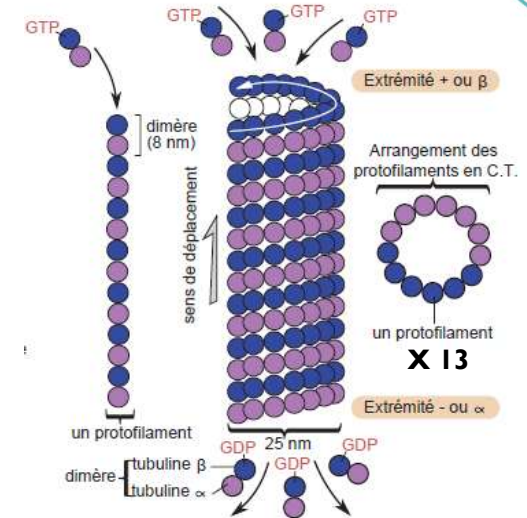
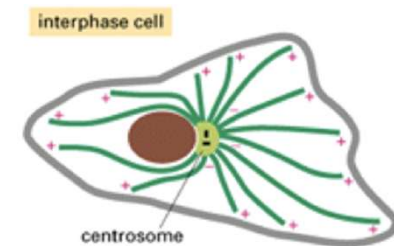
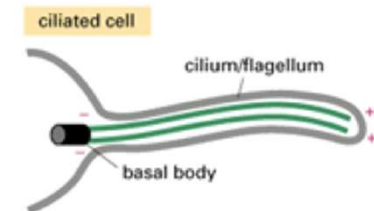
MTOC : n.m. (angl. « microtubule organization center »)
centre d'organisation des microtubules



MT : observation au MET et schéma



Localisation des **microtubules** par marquage immunofluorescent (MO à fluorescence)

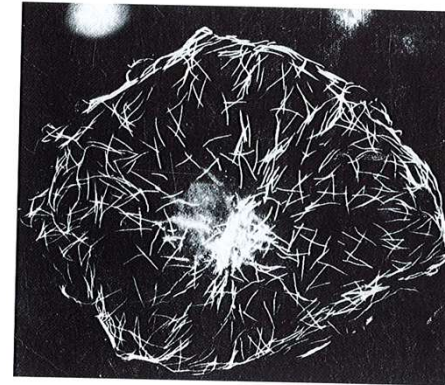


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

Dynamique (1/2)

- Les microtubules se polymérisent et se dépolymérisent spontanément en fonction de la [tubuline]
- Polymérisation plus rapide à l'extrémité (+)
- Dépolymérisation favorisée par l'hydrolyse du GTP



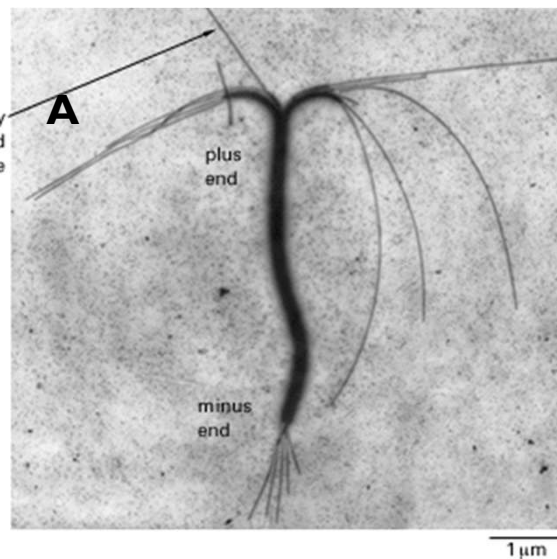
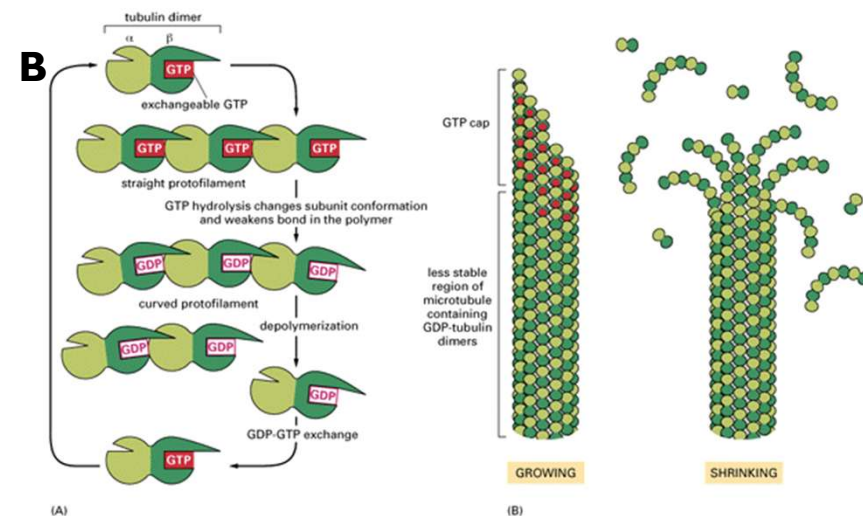
1. Injection de tubuline marquée dans des fibroblastes.
2. Détection par immunofluorescence après 1 min (grâce à des Ac dirigés contre le marqueur et associés à un fluorochrome)

Mise en évidence de l'aspect dynamique des microtubules

→ **Incorporation rapide de la tubuline aux extrémités des microtubules**

Polymérisation et dépolymérisation des microtubules
(Alberts, ed 1994, p.1517)

A = MET
B= schéma



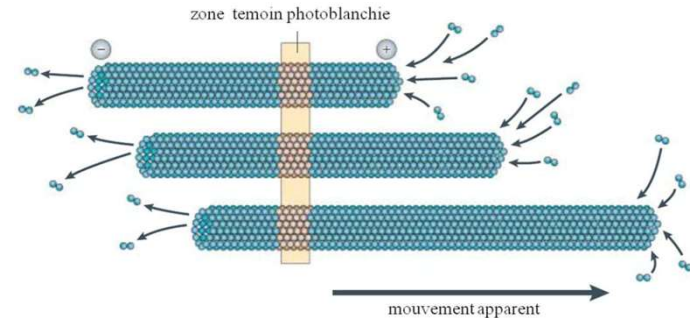
A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

Dynamique (2/2)

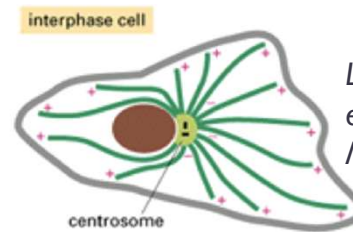
- Microtubule *in vitro*, extrémités libres : pour une certaine [dimère de tubuline] → **tapis roulant**

Tapis roulant
(Lloyd and Chan, 2004)

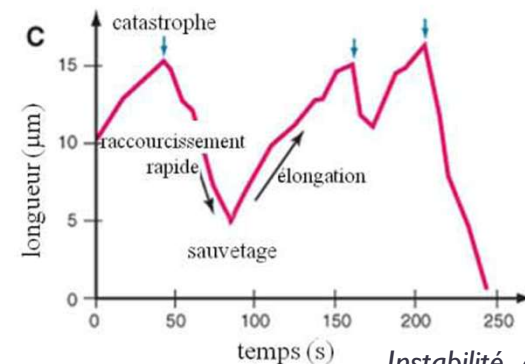


- Microtubule *in vivo*, extrémités (-) fixées au **MTOC*** :

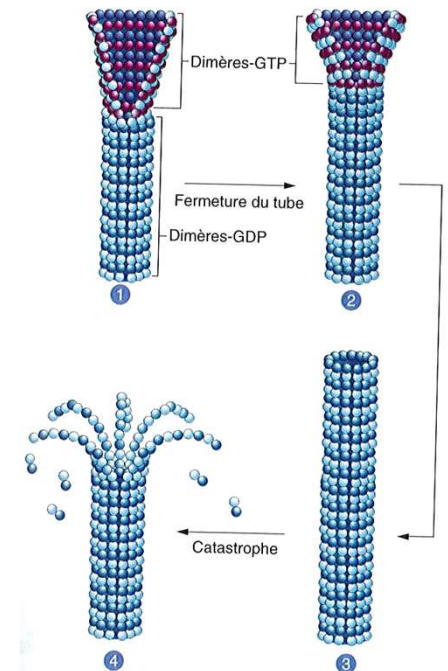
- Centre de **nucléation** pour démarrer la polymérisation
- Les MT se déploient à partir du MTOC
- Stabilise le pôle (-)
- Croissance orientée côté (+)
- Or dépolymérisation du côté (+) favorisée par l'hydrolyse du GTP
- ✓ **instabilité dynamique** = alternance de catastrophe/sauvetage



Le centrosome,
exemple de
MTOC



Instabilité dynamique



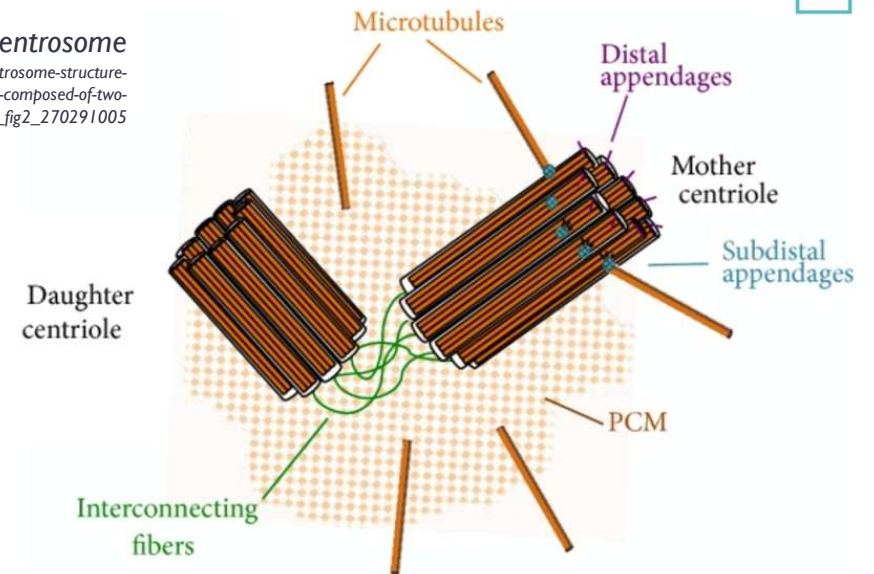
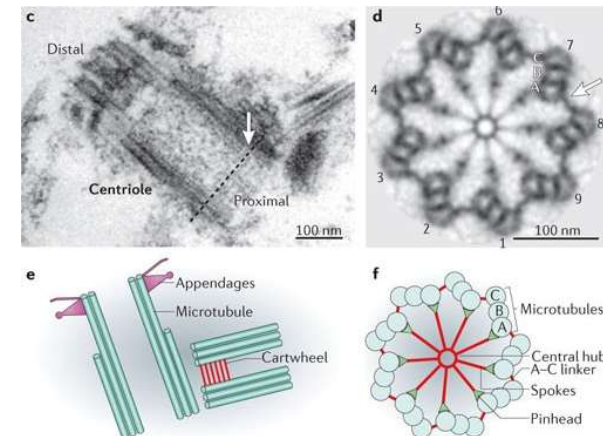
A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

Le MTOC

- Le MTOC est le **centre de nucléation** des MT chez les eucaryotes (sauf végétaux)
- Chez les animaux le MTOC correspond au **centrosome (=diplosome)** situé **près du noyau**.
 - **Centrosome** = paire de centrioles disposés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre
 - **Centriole** = assemblage de 9 triplets MT courts (0,5 μm) et stables
- Les centrioles sont entourés de **matériel péri-centriolaire** (MPC) - de nature protéique
- Le centrosome se réplique pendant l'interphase (phase S) en prévision de la division cellulaire

Structure du centrosome
https://www.researchgate.net/figure/Centrosome-structure-Centrosomes-are-small-organelles-composed-of-two-perpendicular_fig2_270291005



Structure d'un centriole

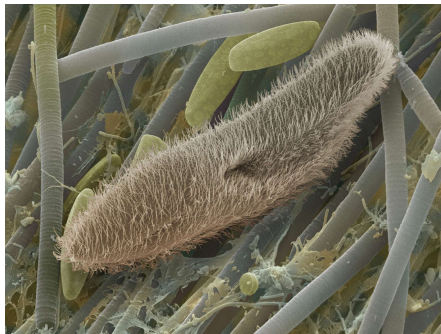


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

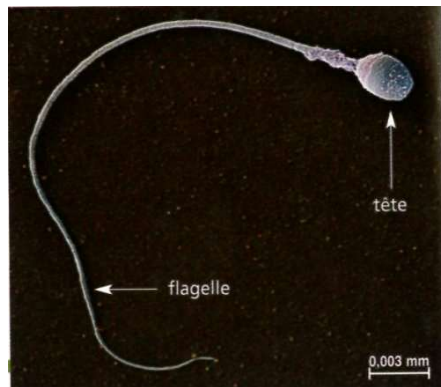
3. Les microtubules

Fonctions (1/3)

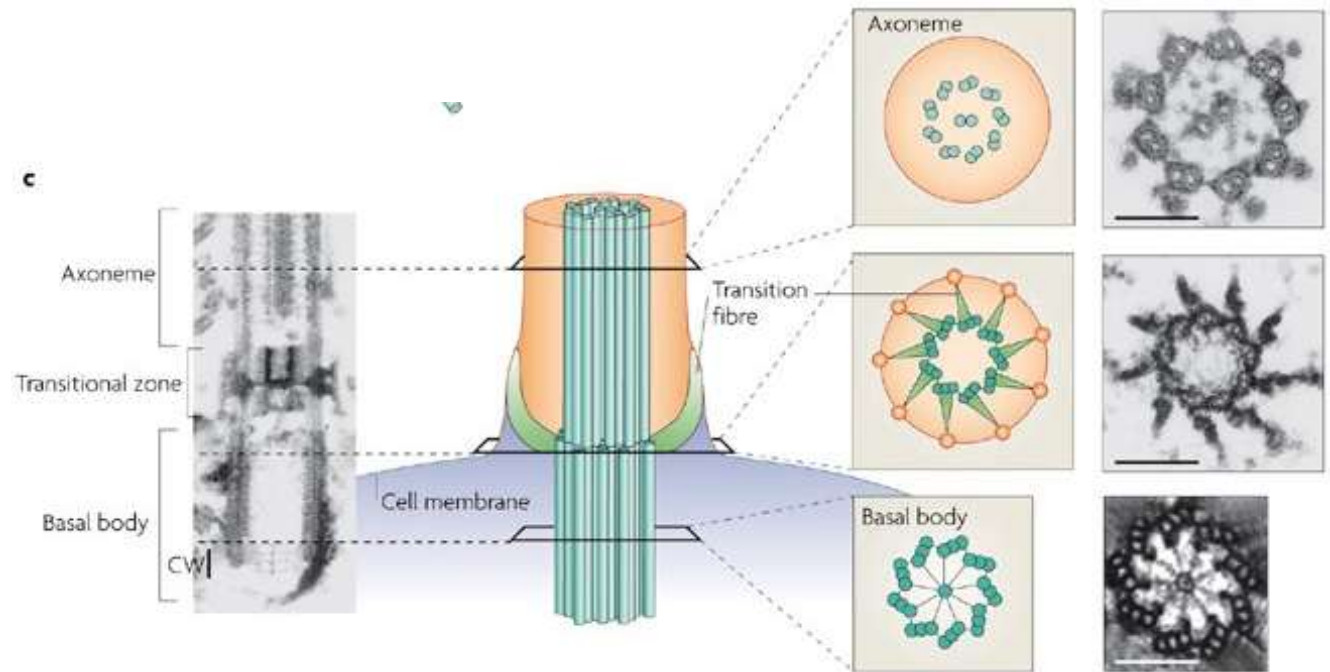
- **Déplacements cellulaires (motilité)**
grâce aux **cils** et **flagelles**



*Paramécie
recouverte
de cils*

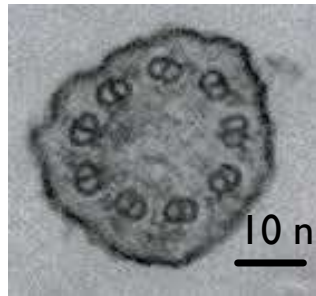


*Spermatozoïde
et son flagelle*

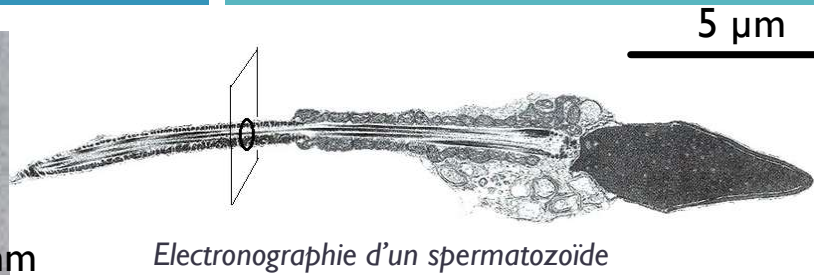


Structure des cils et des flagelles.

L'organisation des cils et flagelles est dite « en 9+2 » = **9 doublets périphériques** et 2 centraux).
Elle rappelle la structure des centrioles (9 triplets de microtubules)



CT d'un axonème de spermatozoïde



Electronographie d'un spermatozoïde

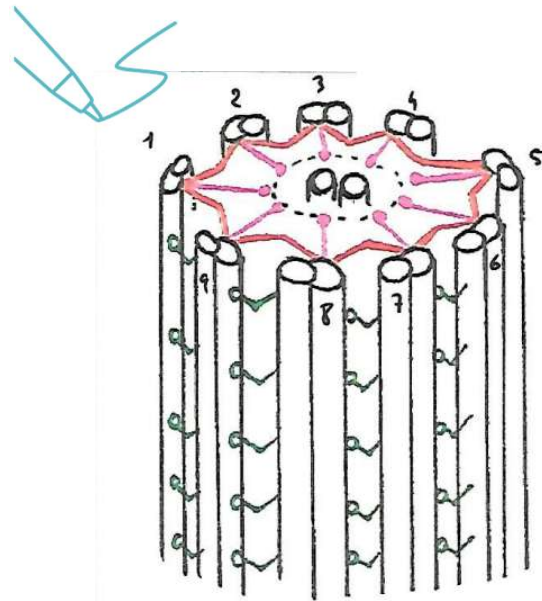
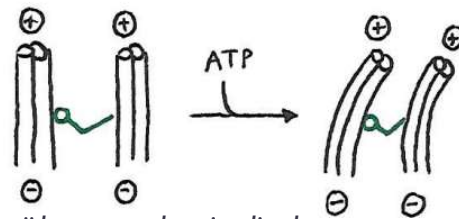
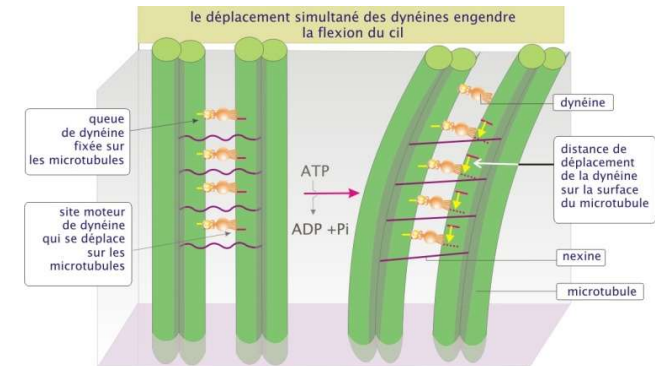
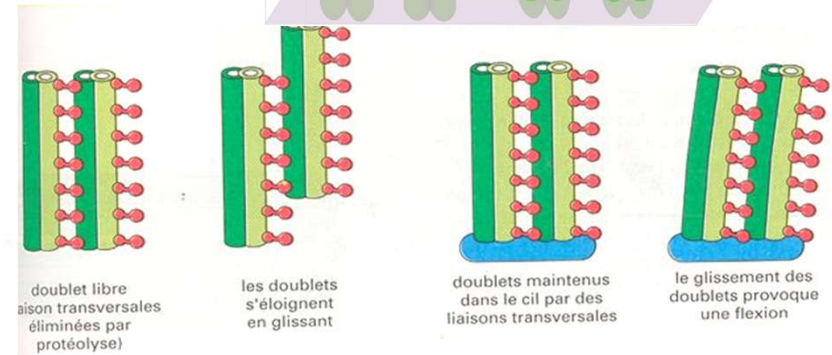


Schéma d'un axonème de flagelle de spermatozoïde en vue longitudinale

-  microtubule
-  **dyneïne**
-  **Bras rayonnant**
-  **nexine**



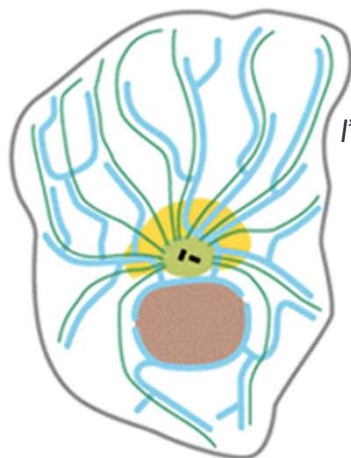
La flexion de l'axonème à l'origine des mouvements ondulatoires est permise par le déplacement des dynéines (après hydrolyse de l'ATP), mais également par l'existence de liaisons transversales

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

Fonctions (2/3)

- Localisation et transport de matériel cellulaire
→ « **autoroutes** » cytoplasmiques
 - molécules
 - vésicules et organites
 - chromosomes pendant les divisions cellulaires



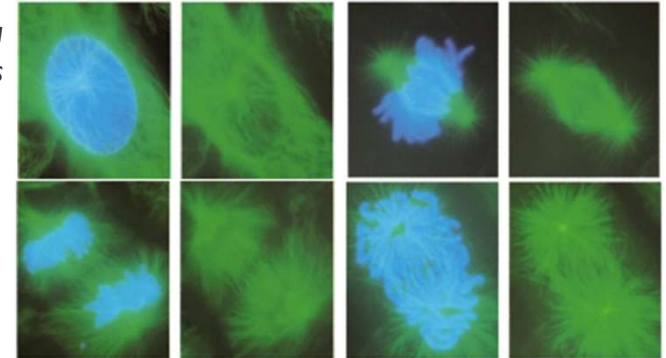
Localisation du RE et de l'appareil de Golgi en lien avec celle des microtubules

Microtubules
RE
Appareil de Golgi
Noyau

→ Mécanisme du transport le long des microtubules ?

Déplacement des chromosomes pendant la mitose grâce aux microtubules

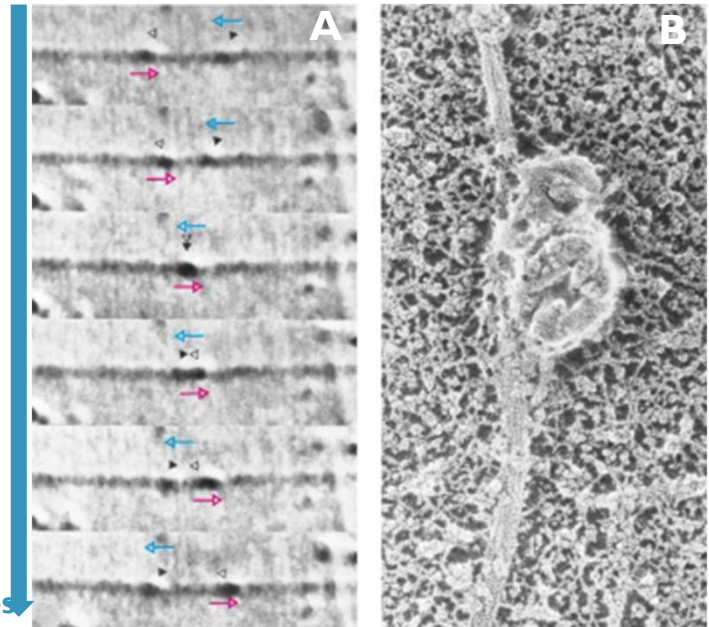
microtubules
chromosomes



Cell, Harvey Lodish, ed. 2008

A. Observation du déplacement de 2 vésicules en sens opposé le long des microtubules, in vitro (microscope à interférence (DIC), timelapse)

B. Vésicule associée à un microtubule (MET)



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

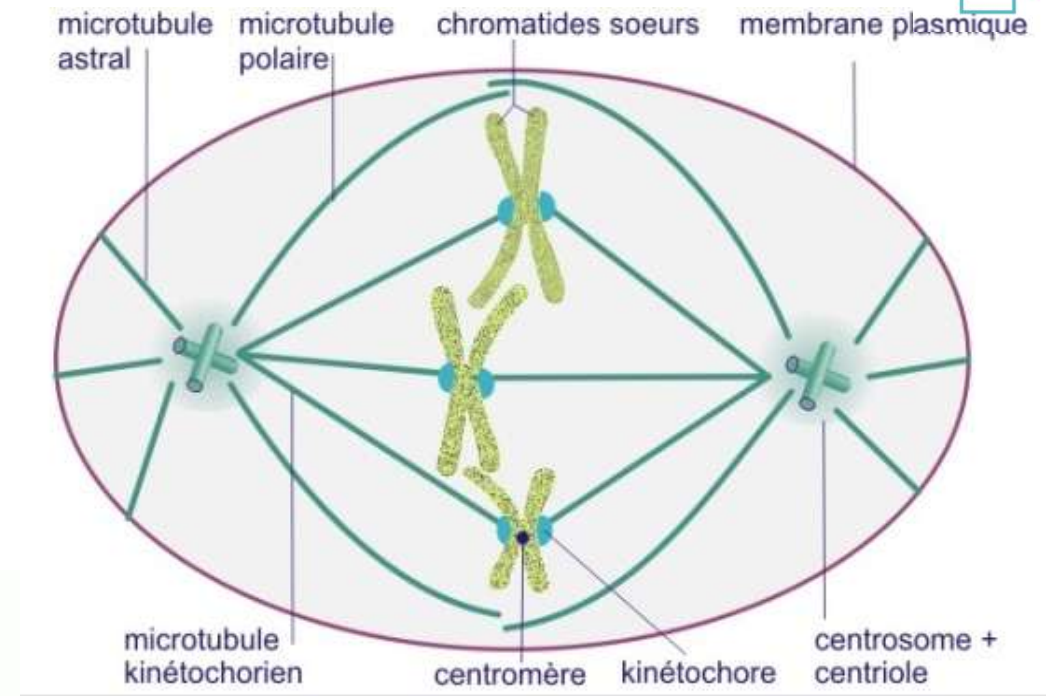


3. Les microtubules

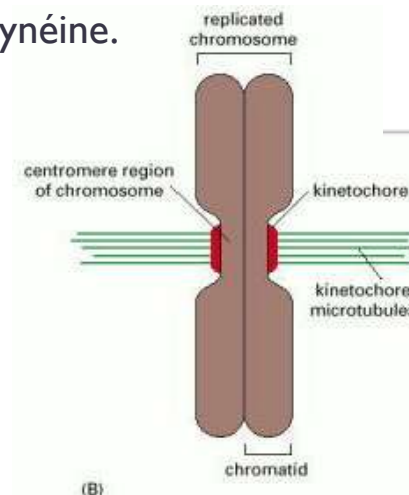
Fonctions (3/3)

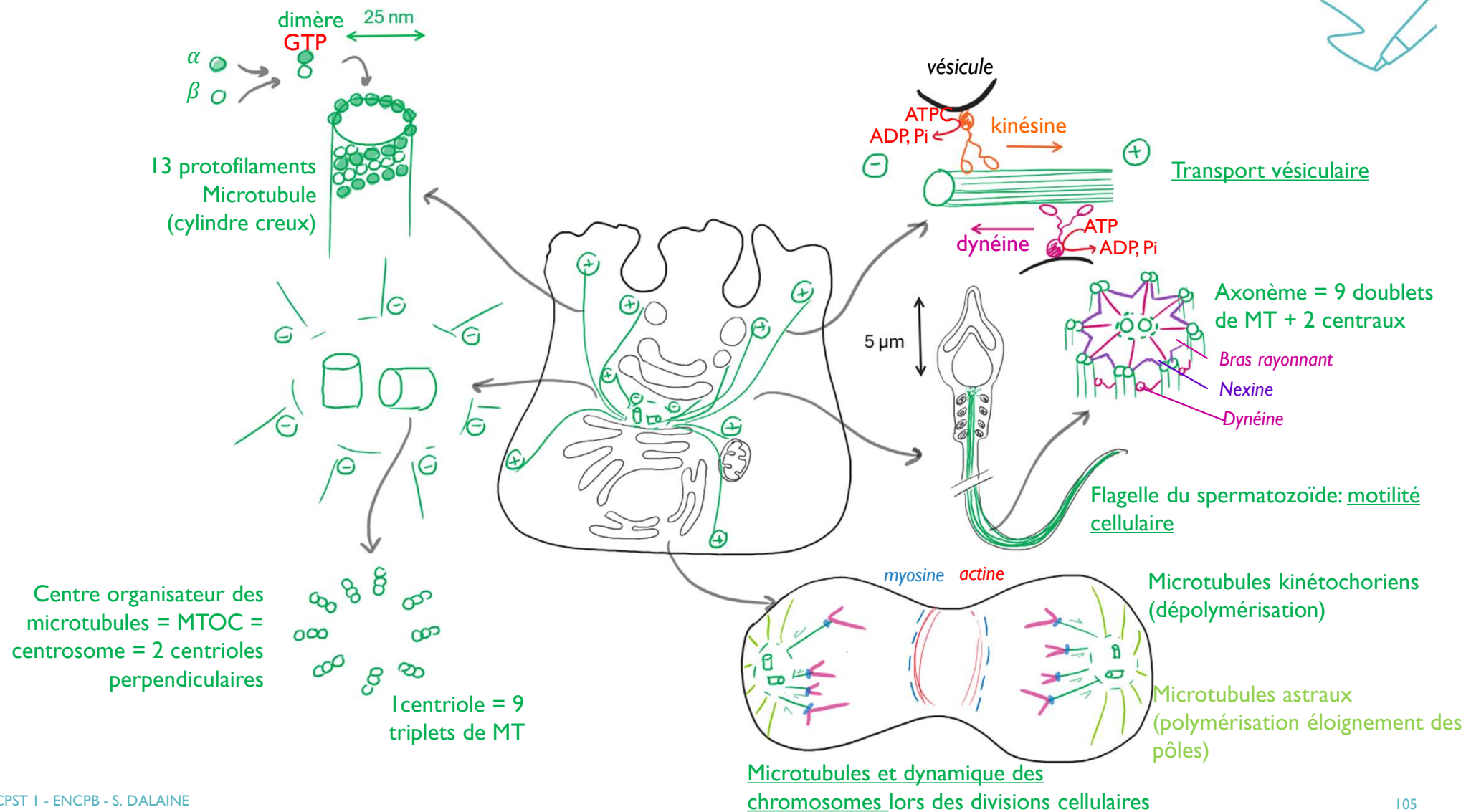
Microtubules: rôles essentiels dans les divisions cellulaires → ballet des chromosomes.

- **microtubules kinétochoriens** → **dépolymérisation** du microtubule kinétochorien ⇒ migration de la chromatide vers le pôle - (en anaphase).
- **microtubules astraux** : lien entre centrosome et la membrane plasmique par l'intermédiaire de moteurs moléculaires comme la dynéine.
- **microtubules polaires** : partant du centrosome, ils se rejoignent sur la plaque métaphasique et sont connectés par des moteurs moléculaires de type kinésine.



Cytosquelette et mitose





A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

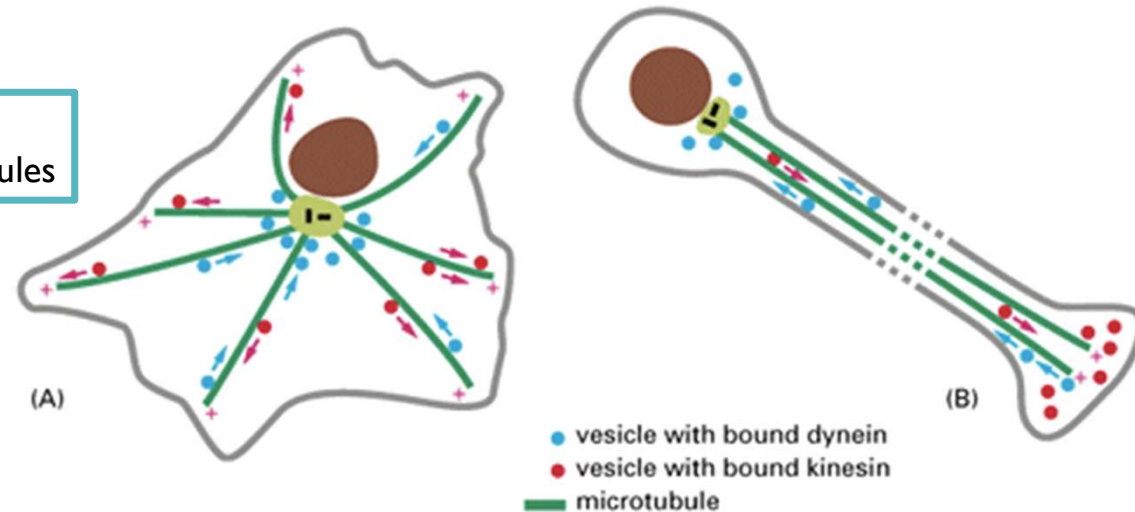
3. Les microtubules

Les MAPS

MAPS : (angl. « Microtubule associated proteins ») protéines associées aux microtubules

- Les **MAPS motrices** assurent tous les mouvements associés aux microtubules

- Transport de molécules (ARNm)
- Transport des vésicules, organites
- Mouvement des chromosomes

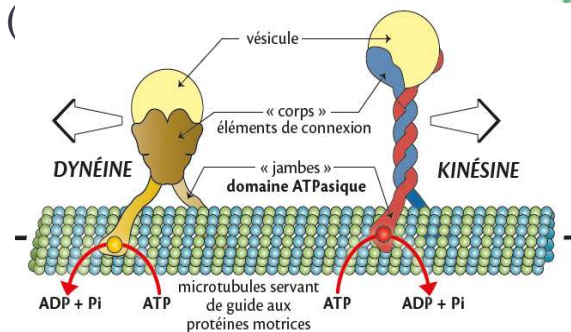
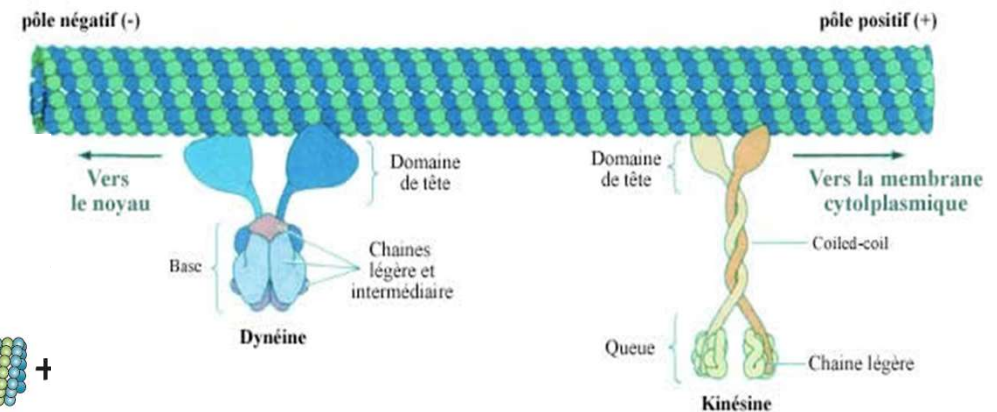


Sens de déplacement des MAPS le long des microtubules

- Deux types de **moteurs moléculaires** :

- La **dynéine**
- → déplacement vers le pôle (-)
- La **kinésine**
- → déplacement vers le pôle (+)

- Ces moteurs moléculaires fonctionnent en hydrolysant l'ATP



Structure moléculaire des MAPS

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

3. Les microtubules

Les MAPS

<https://www.youtube.com/watch?v=YAva4g3Pk6k>



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

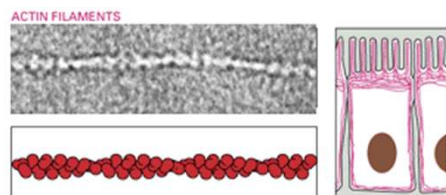
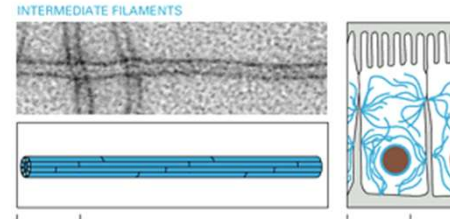
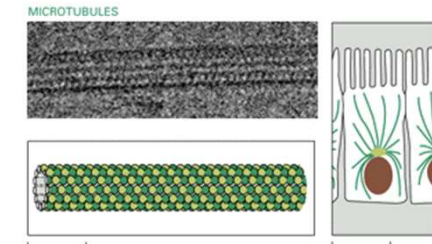
BILAN



Cytosquelette = polymères de protéines fibreuses, dynamiques.

Il définit la forme des cellules et la structure de « gel » du cytoplasme ; il permet les mouvements cellulaires.

Caractères	Microfilaments	Filaments intermédiaires	Microtubules
Diamètre	7 – 8 nm	10 -12 nm	25 nm
Protéines constitutives	Actine G associée à ATP/ADP et Ca^{2+}	Variées (lamine, cytokératine, ...)	Hétérodimères de tubulines α et β associée à GTP/GDP
Structure	Filaments pleins ; 2 chaînes torsadées Filaments polarisés	Filaments cylindriques pleins ; tétramères bout à bout et côte à côte Filaments non polarisés	Filaments cylindriques et creux Filaments polarisés
Etat	Dynamique → « tapis roulant »	Stable	Dynamique → « instabilité dynamique »
Distribution dans la cellule	Sous le plasmalemme	Tapissent la membrane interne du noyau (lamina) ; autour du noyau et en travées dans le cytoplasme	En partie rayonnante à partir du MTOC
Fonctions	Forme des cellules ; contraction cellulaire ; transport vésiculaire ; motilité	Forme du noyau et de la cellule ; assurent cohérence et résistance intercellulaire	Transport de matériel intracellulaire (molécules, vésicules, organites, chromosomes) ; Motilité (cils et flagelles)



→ Les différents éléments du cytosquelette sont en interaction.

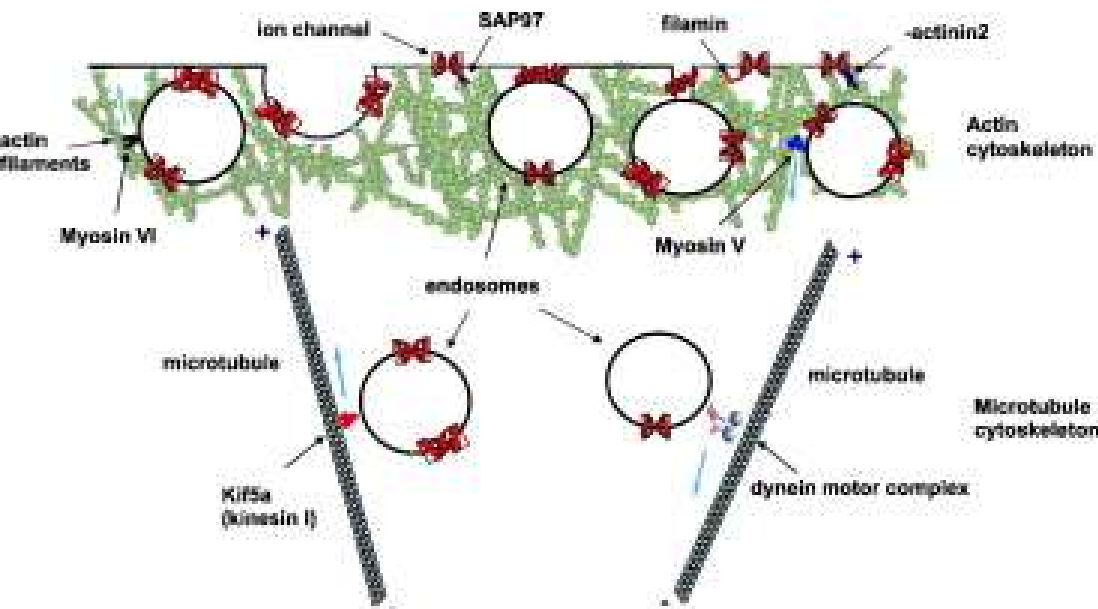
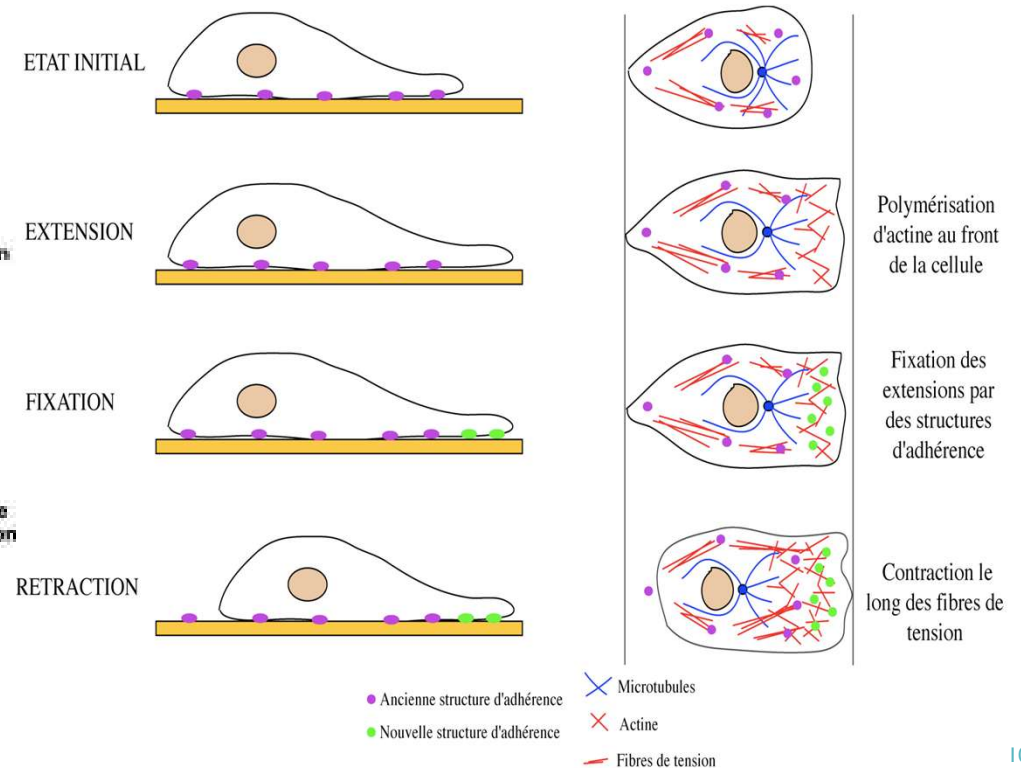


A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

BILAN

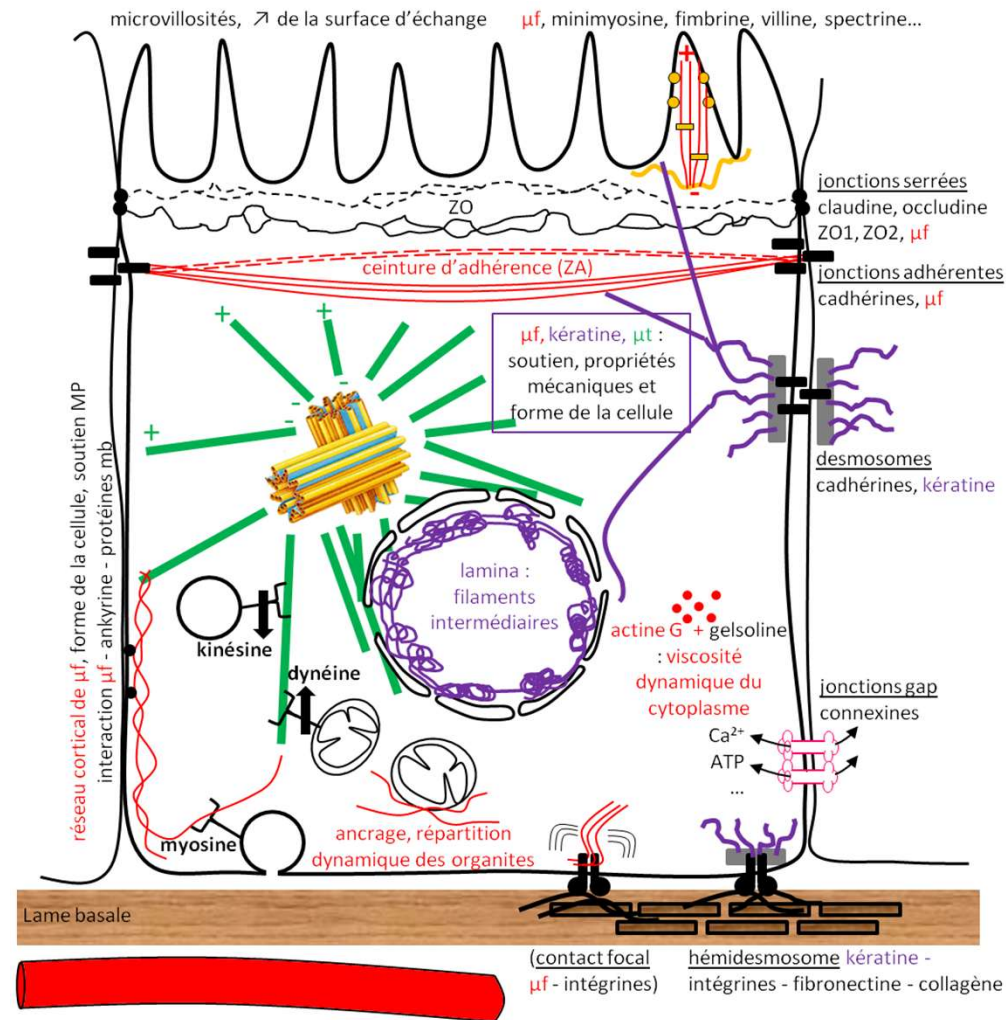
- Complémentarité des MF d'actine et des MT pour le transport de matériel intracellulaire
 - MT → « autoroute » à travers toute la cellule
 - MF → « départementales » aux abords de la mb

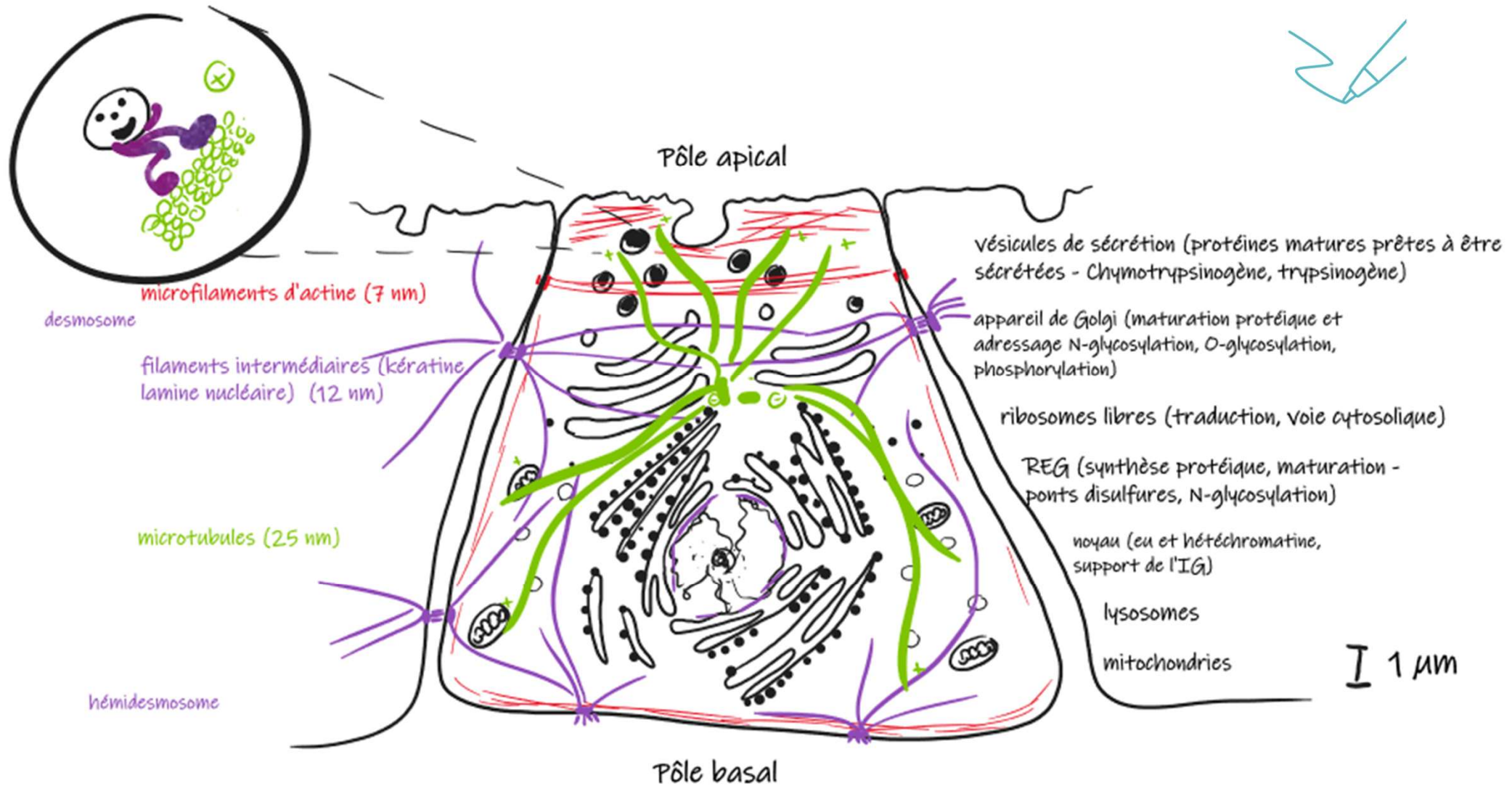
- Rôle des MF d'actine et de MT lors de la division cellulaire
- Rôle des MF d'actine dans la motilité cellulaire



A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

BILAN

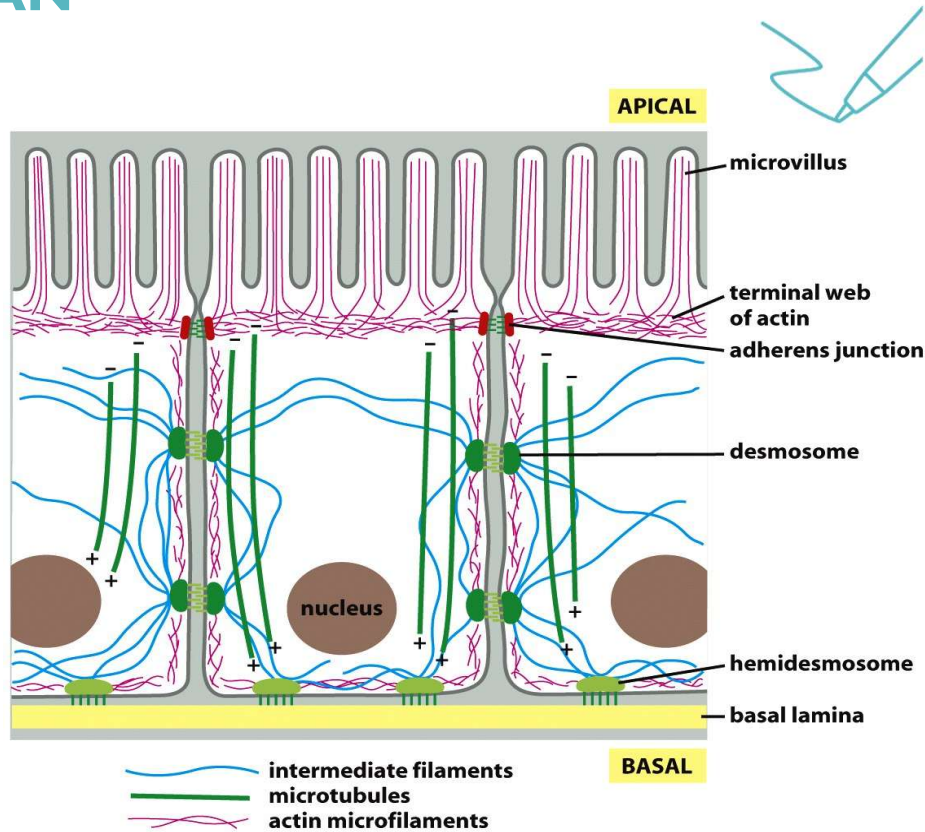




Le cytosquelette, cas de la CAP (S. Dalaine)

A. LES ÉLÉMENTS DU CYTOSQUELETTE CHEZ LES CELLULES EUCARYOTES

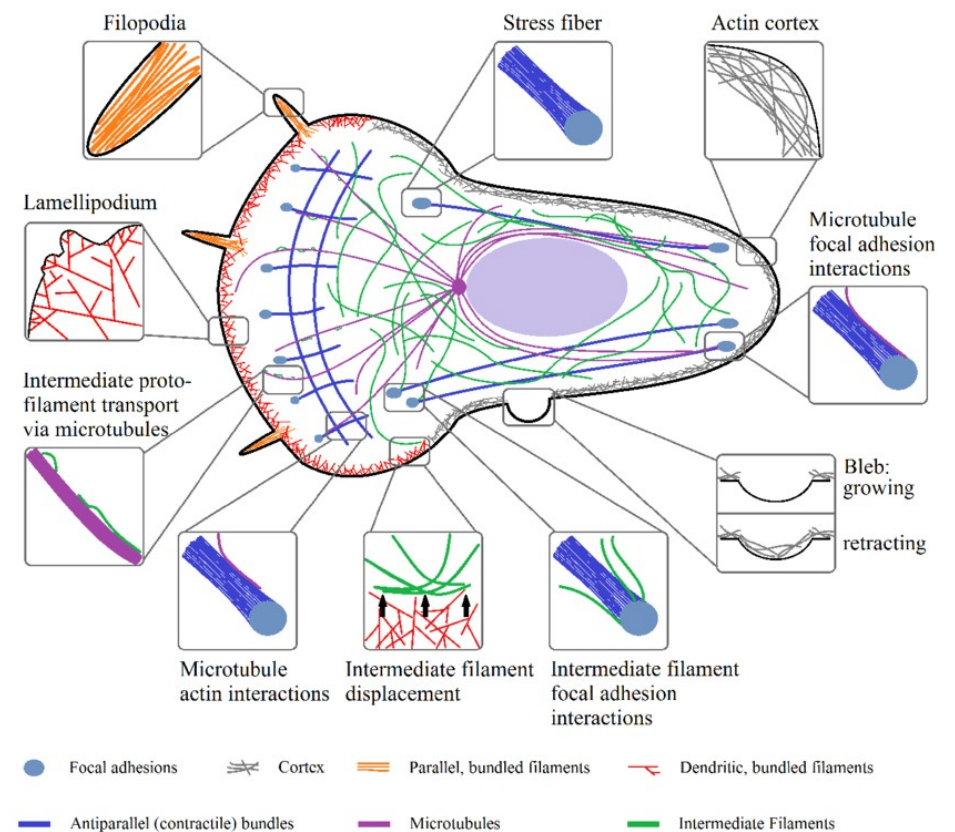
BILAN



Cell, Bruce Alberts, ed 1994, p.1517

Organisation des éléments du cytosquelette dans une cellule polarisée

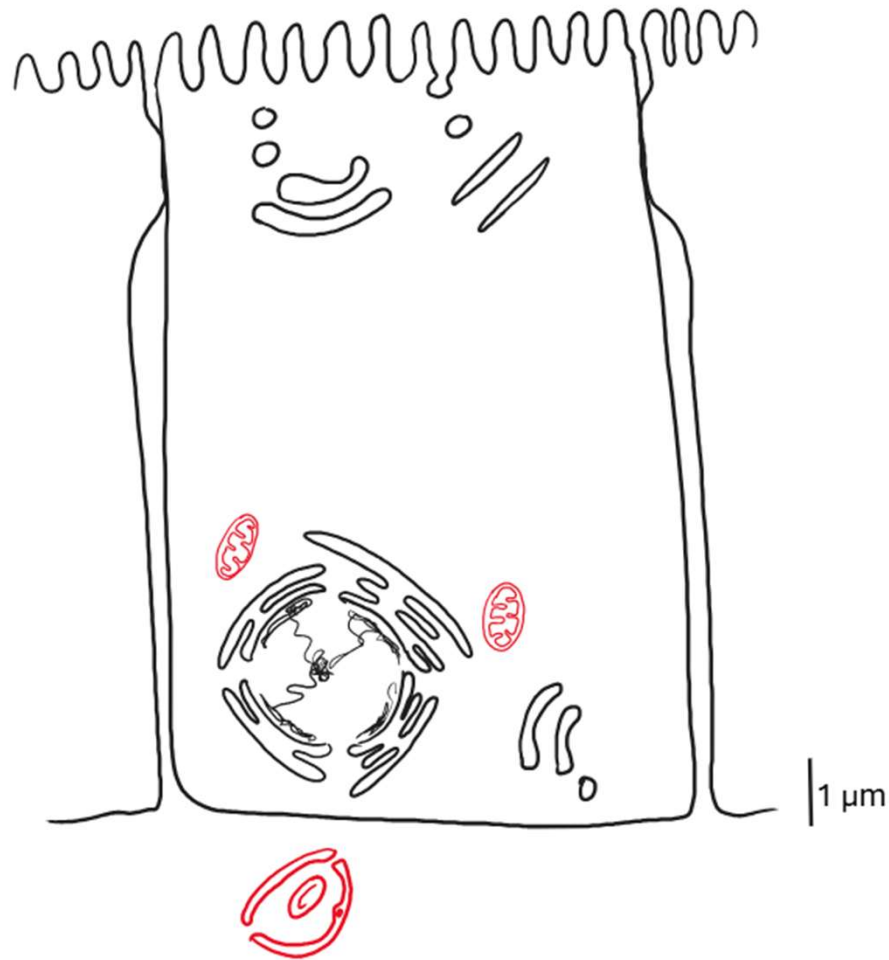
BCPST 1 - ENCPB - S. DALAINE



https://www.researchgate.net/figure/Organizational-structures-of-actin-microtubules-and-intermediate-filaments-inside-of-a_fig3_332515317

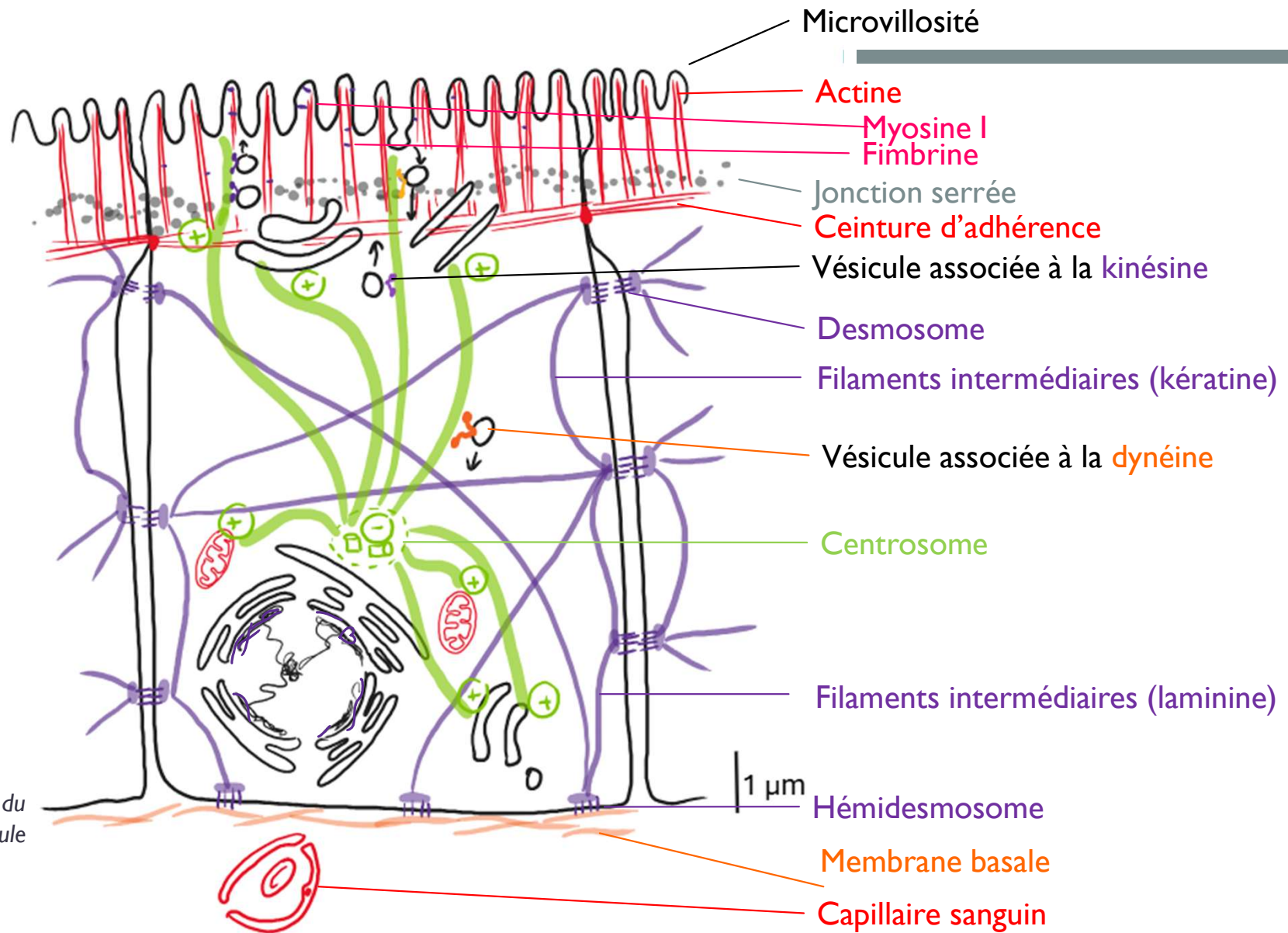
Organisation des éléments du cytosquelette dans la cellule et leurs interactions physiques

ULTRASTRUCTURE CELLULAIRE



Pour la prochaine séance, je vous recommande d'ajouter à ce schéma l cytosquelette (rouge pour les μf d'actine, violet pour les filaments intermédiaires et vert pour les μT).





Organisation des éléments du cytosquelette dans une cellule polarisée, un entérocyte

II. LE CYTOSQUELETTE: ARMATURE PROTÉIQUE DE LA CELLULE IMPLIQUÉE DANS SA STRUCTURE ET SA DYNAMIQUE

B. DES PROTÉINES HOMOLOGUES AU CYTOSQUELETTE CHEZ LES BACTÉRIES



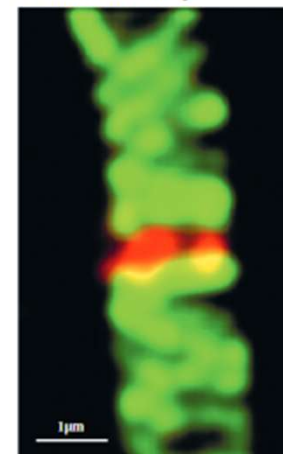
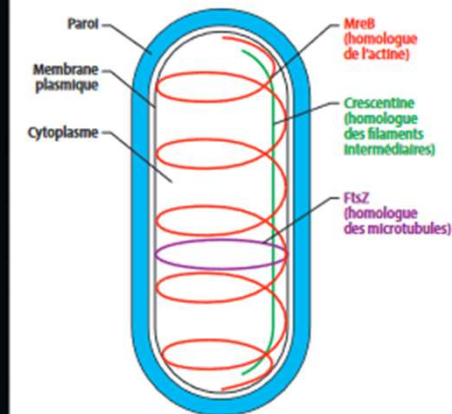
■ Protéine **FtsZ** : homologue à la tubuline eucaryote

- issues d'une protéine ancestrale
- Chez les bactéries, cette protéine intervient au cours de la **division cellulaire** et s'assemble en anneau au site de la future séparation des deux cellules.
- Chez les bactéries, cette protéine recrute d'autres protéines qui participent à **l'étranglement du cytoplasme** et à la synthèse de composés pariétaux entre les deux futures cellules bactériennes.
- Des protéines proches de FtsZ existent chez les chloroplastes et jouent un rôle semblable.

ÉGALEMENT PRÉSENT CHEZ LES BACTÉRIES

Filament intermédiaire	Homologue Actine	Tubuline	Propre aux Bactéries Famille WACA
Crescentine ⇒ détermination de la forme cellulaire	FtsA ⇒ division cellulaire MreB, ParM ⇒ structure filamenteuse, séparation des plasmides	FtsZ ⇒ division cellulaire TubZ ⇒ séparation des plasmides	MinD ⇒ division cellulaire ParA ⇒ ségrégation chromosomique

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



► **Figure 6.14.** Les protéines homologues aux protéines du cytosquelette eucaryote chez les bac (Barre d'échelle : 1 μm).
D'après Vuibert

II. LE CYTOSQUELETTE: ARMATURE PROTÉIQUE DE LA CELLULE IMPLIQUÉE DANS SA STRUCTURE ET SA DYNAMIQUE

B. DES PROTÉINES HOMOLOGUES AU CYTOSQUELETTE CHEZ LES BACTÉRIES

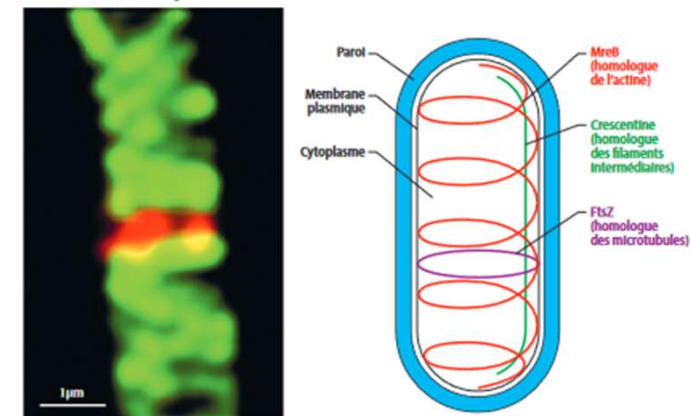


- Protéine **MreB** : **homologue à l'actine eucaryote**
 - filaments de forme hélicoïdale
 - impliquée dans la **croissance en longueur** des bactéries de type bacille
 - Détermination de la **forme cellulaire**
- **crescentine** : **homologue aux filaments intermédiaires comme la kératine.**
 - assemblage de 4 hélices fibreuses
 - Détermination de la **forme cellulaire**

ÉGALEMENT PRÉSENT CHEZ LES BACTÉRIES

	Homologue		Propre aux Bactéries
Filament intermédiaire	Actine	Tubuline	Famille WACA
Crescentine ⇒ détermination de la forme cellulaire	FtsA ⇒ division cellulaire MreB, ParM ⇒ structure filamenteuse, séparation des plasmides	FtsZ ⇒ division cellulaire TubZ ⇒ séparation des plasmides	MinD ⇒ division cellulaire ParA ⇒ ségrégation chromosomique

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



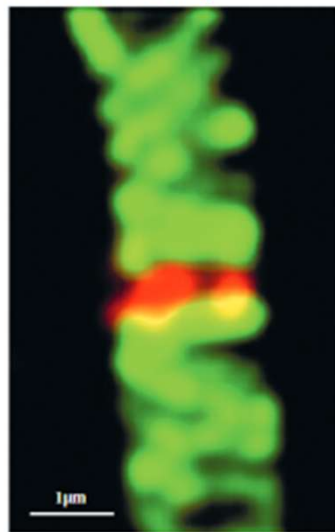
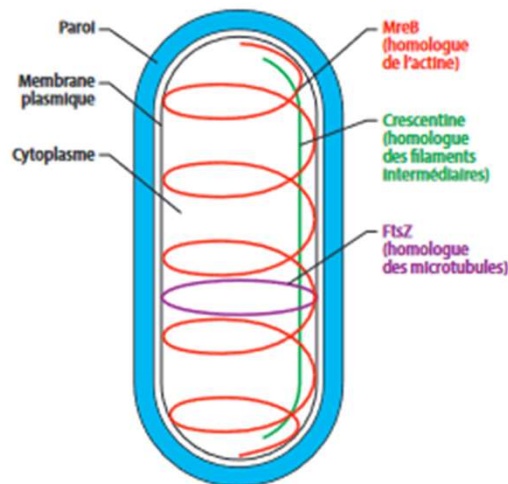
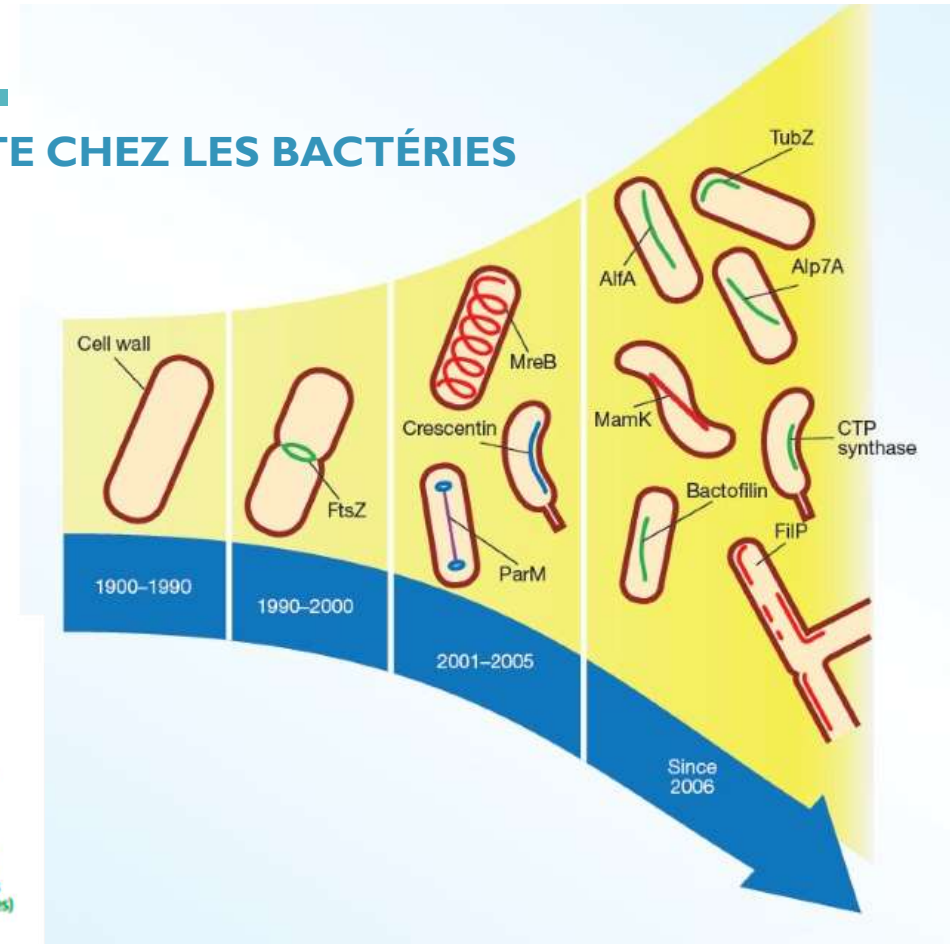
► Figure 6.14. Les protéines homologues aux protéines du cytosquelette eucaryote chez les bactéries (Barre d'échelle : 1 µm).

D'après Vuibert

B. DES PROTÉINES HOMOLOGUES AU CYTOSQUELETTE CHEZ LES BACTÉRIES

- Protéine **FtsZ** : homologue à la tubuline eucaryote
 - division cellulaire
 - étranglement du cytoplasme
- Protéine **MreB** : homologue à l'actine eucaryote
 - croissance en longueur des bactéries de type bacille
 - forme cellulaire
- **Crescentine** : homologue aux filaments intermédiaires comme la kératine.
 - forme cellulaire

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



SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule

PLAN DU COURS

I. Les cellules : des unités autonomes plus ou moins compartimentées délimitées par une membrane plasmique

- A. Les cellules procaryotes : des cellules peu ou pas compartimentées délimitées par une ou deux membranes
 - 1. Organisation d'une cellule procaryote : exemple des bactéries
 - 2. Une compartimentation possible associée à une régionalisation du fonctionnement cellulaire
- B. Les cellules eucaryotes : des cellules compartimentées
 - 1. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique
 - 2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire
 - 3. Les lysosomes
 - 4. Les peroxysomes
 - 5. Les vacuoles
 - 6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif
 - 7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes
- C. Conséquences de la compartimentation cellulaire

II. Le cytosquelette : armature protéique de la cellule impliquée dans sa structure et sa dynamique

- A. Les éléments du cytosquelette chez les cellules eucaryotes
 - 1. Les microfilaments d'actine
 - 2. Les filaments intermédiaires
 - 3. Les microtubules
 - 4. L'importance du cytosquelette dans la migration des cellules animales

B. Des protéines homologues au cytosquelette eucaryote chez les bactéries

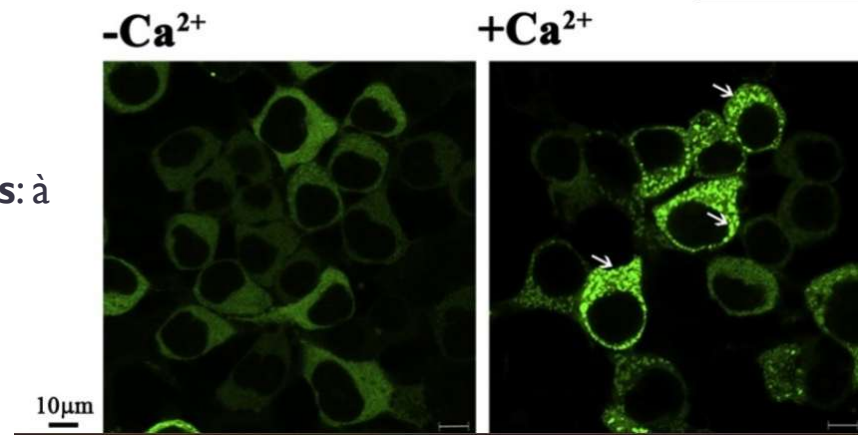
III. Les cellules : des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux

- A. Des flux de matière
- B. Des flux d'information
- C. Des flux d'énergie

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX A. DES FLUX DE MATIÈRE

Introduction

- Les **flux transmembranaires**: à travers la membrane.
 - Actifs
 - Passifs
 - Avec ou sans protéines membranaires.
- Les **flux faisant intervenir des déformations de la membrane** : endocytose et exocytose



Mise en évidence d'un influx d'ions calcium par l'aequorine qui émet une fluorescence verte en présence de Ca^{2+}

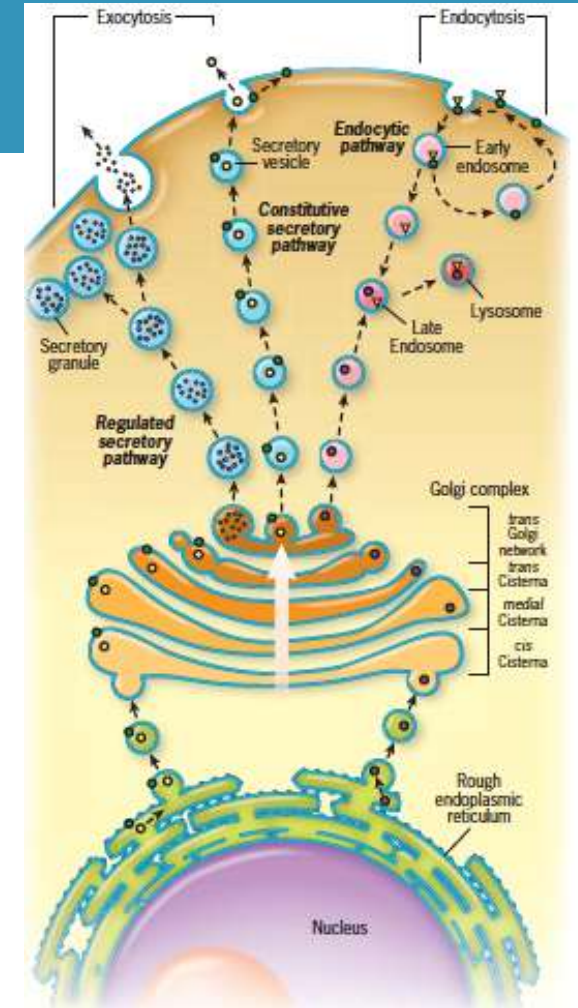


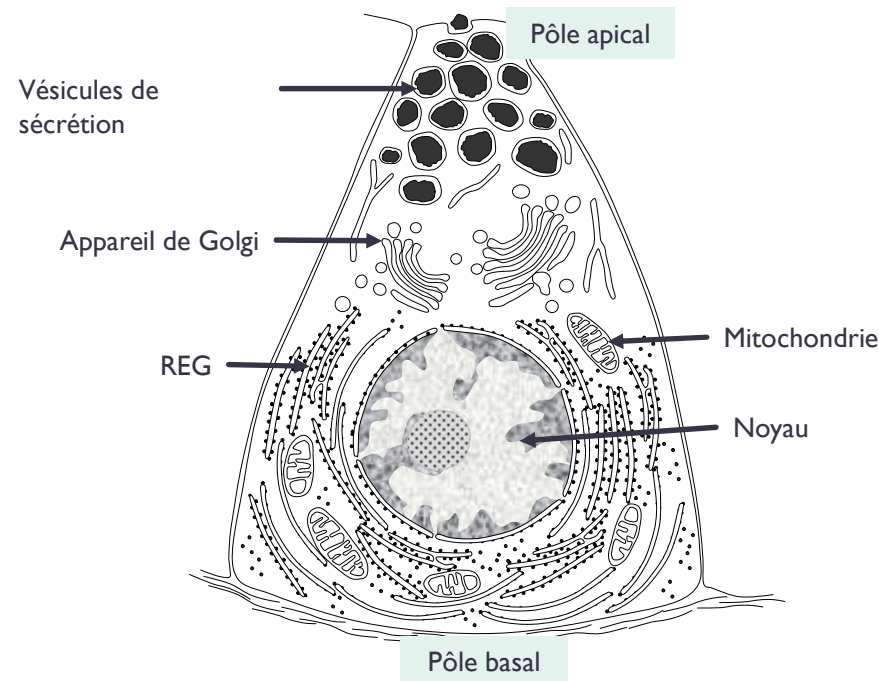
Schéma des cycles au sein d'une cellule eucaryote

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

- Expérience historique de Palade en 1967
- **Objectif** : suivre le devenir de protéines néosynthétisées, destinées à être sécrétées.
- **Question** : quelle est la voie empruntée par les protéines sécrétées, depuis leur synthèse jusqu'à leur sécrétion, et selon quelle cinétique ?
- **Modèle** : la cellule acineuse pancréatique
 - Production massive de protéines sécrétées
 - Sécrétion cyclique et contrôlée (notamment par la prise de nourriture)
 - Les protéines produites sont des enzymes donc faciles à quantifier

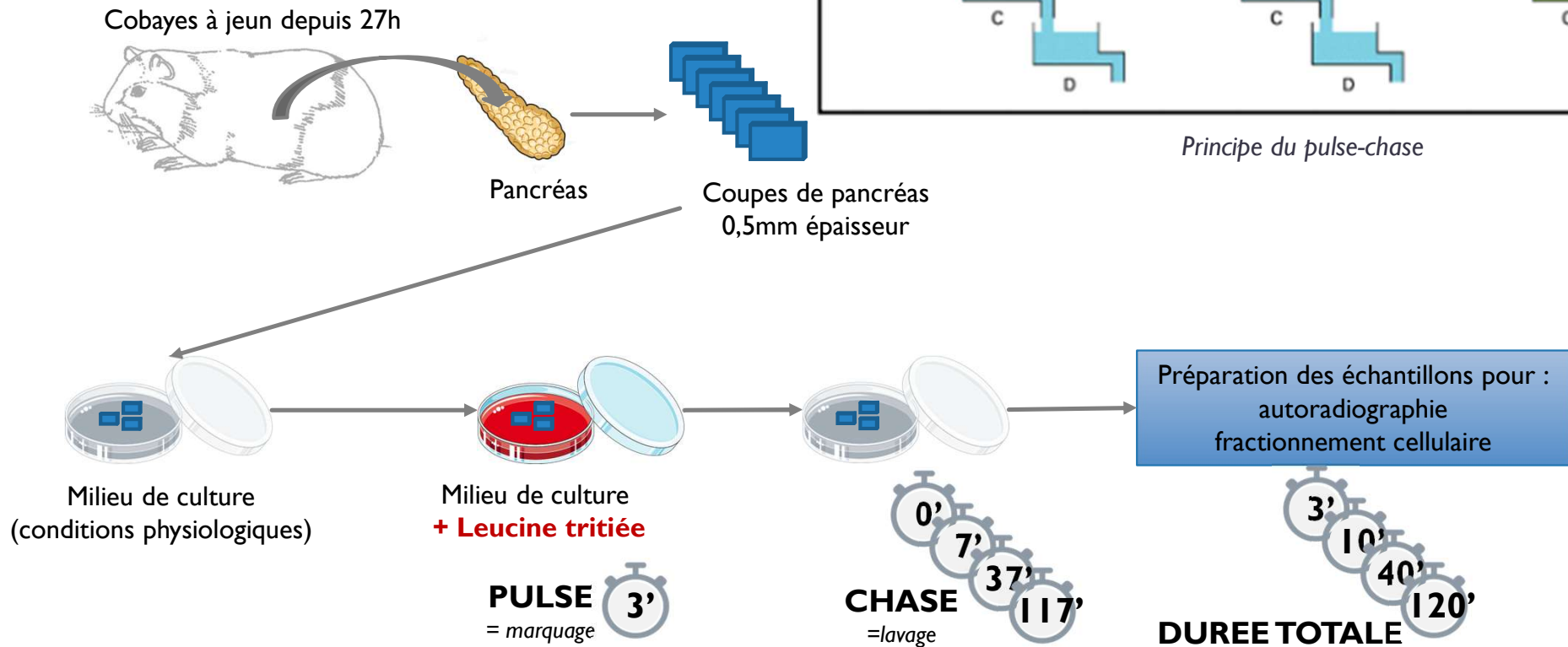


III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

I. I. Méthode : le pulse-chase



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

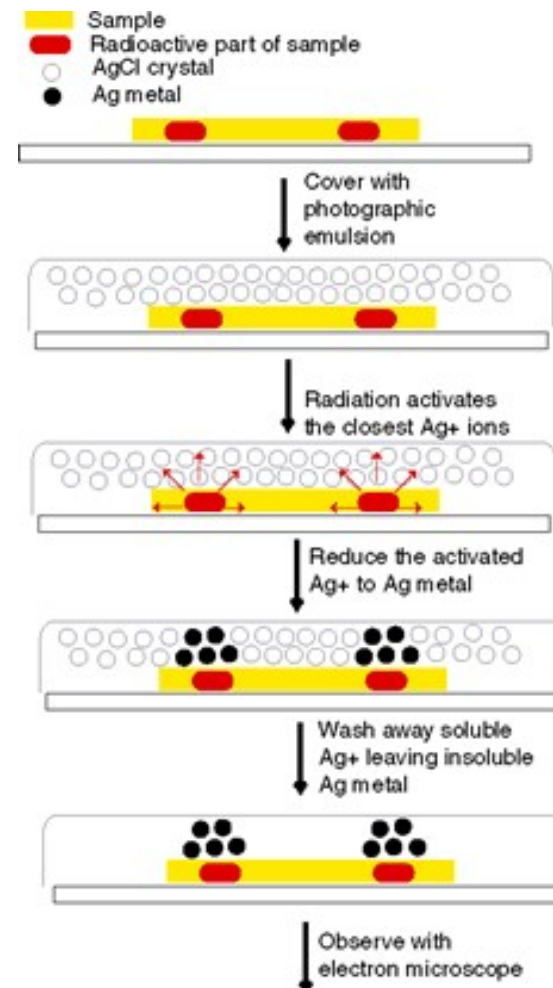
A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

I. 2. Méthode : l'autoradiographie

PRINCIPE :

- Technique qui permet de détecter, dans une émulsion radiographique, des radiations provenant d'une source radioactive préalablement incorporée à un échantillon.
 - La radioactivité se traduit par des tortillons ou des points noirs sur l'électronographie
- Expérience de Palade :
 - utilisation de Leucine (AA exclusivement protéinogène) radioactive (contenant un atome de tritium ^3H , isotope radioactif de H)
 - Objectif : Localiser, sur des coupes histologiques de pancréas, les **protéines synthétisées pendant la période de pulse**.



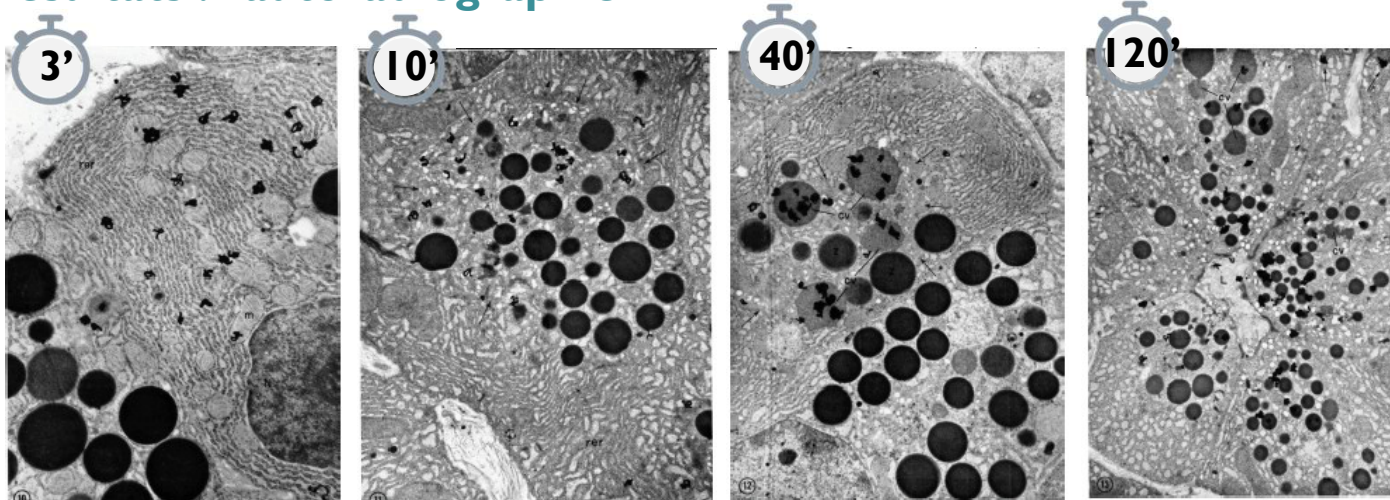


III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

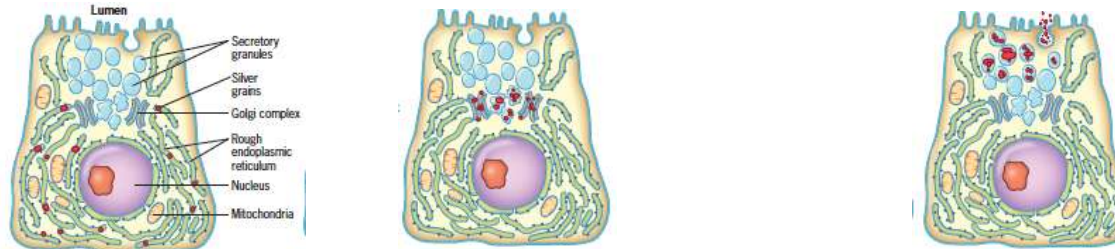
I.1. Résultats : l'autoradiographie



Electronographie suite à l'autoradiographie des coupes de pancréas marquées à la Leucine tritiée

La radioactivité est localisée à différents endroits selon le temps de chase utilisé :

- T = 3' → REG
- T = 10' → Golgi
- T > 40' → vésicules de condensation ; grains de zymogènes, lumière du canalicule



Temps

→ Les protéines synthétisées pendant le pulse se déplacent dans la cellule au cours du temps



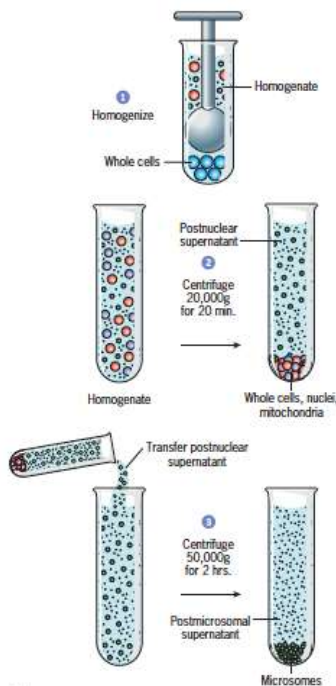
III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

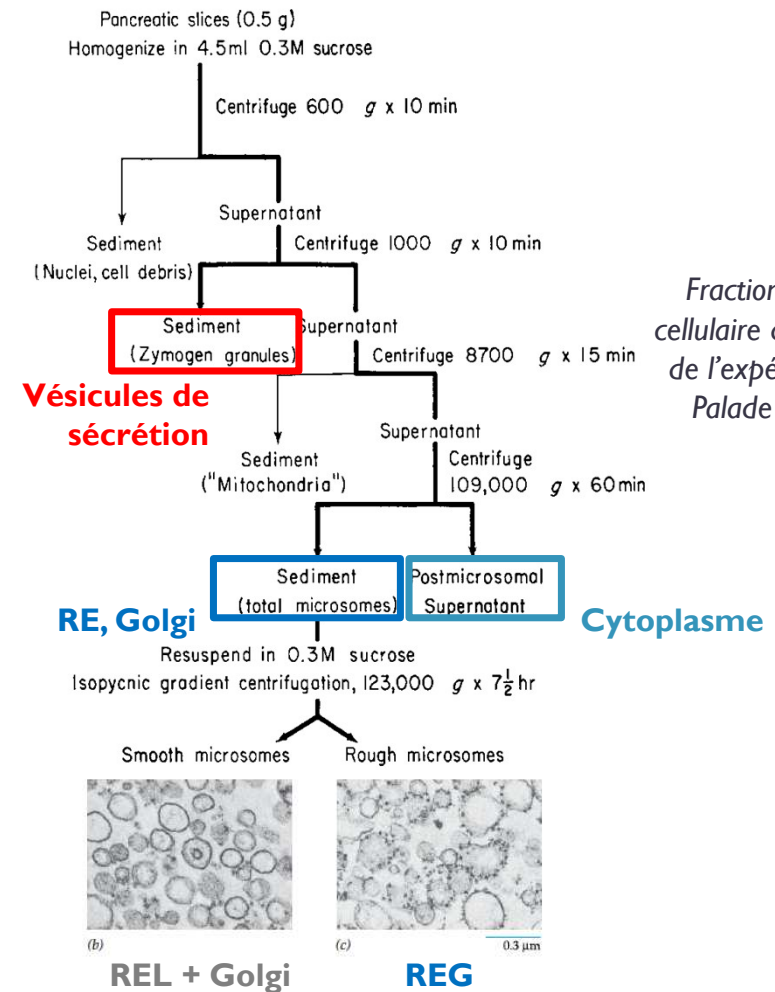
I. Mise en évidence d'un flux de matière

I. 2. Méthode : le fractionnement cellulaire

➤ Expérience de Palade



- Broyage (homogénéisation) des coupes de pancréas
→ formation de **microsomes** correspondant aux différents organites
- Centrifugations successives de durée et force croissantes (en isolant le culot à chaque centrifugation)
→ séparation des microsomes selon leur densité
- La radioactivité de chaque fraction est ensuite dosée.



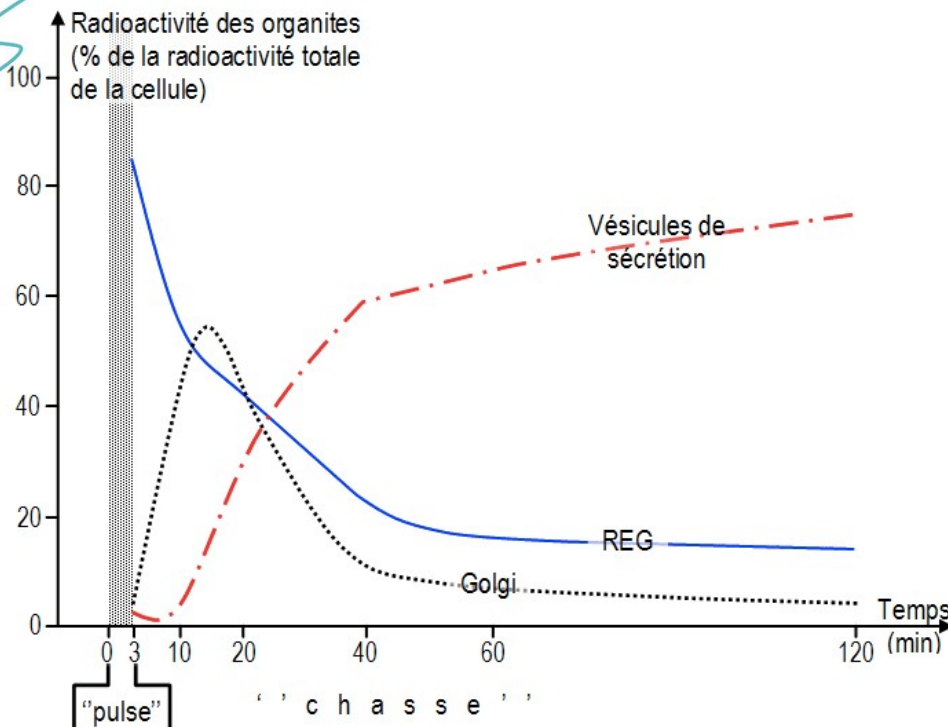
Fractionnement cellulaire dans le cas de l'expérience de Palade (1967)

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

I.3. Résultats : le fractionnement cellulaire



Rem : la radioactivité du **cytoplasme** est faible et constante pendant toute l'expérience

Dosage de la radioactivité des différentes fractions microsomales issues des coupes de pancréas marquées à la Leucine tritiée

La radioactivité des différentes fractions évolue au cours du temps :

- La grande majorité (90%) de la radioactivité se trouve dans le **REG** à 3', puis la radioactivité du REG ne fait que diminuer jusqu'à atteindre 15% au bout de 2h
- La radioactivité dans le **Golgi** augmente (de 0 à 55%) entre 3' et 10' puis diminue jusqu'à atteindre 5% au bout de 2h
- La radioactivité des **vésicules de sécrétion** augmente de façon continue à partir de 10' et atteint 80% au bout de 2h
 - Ainsi à la fin de l'expérience, la radioactivité se trouve majoritairement dans les vésicules de sécrétion
- La radioactivité du cytoplasme est constante durant toute l'expérience
 - la radioactivité ne passe pas par le cytoplasme

→ **Confirmation des résultats d'autoradiographie**

→ **Les protéines marquées ne transitent pas par le cytoplasme**

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

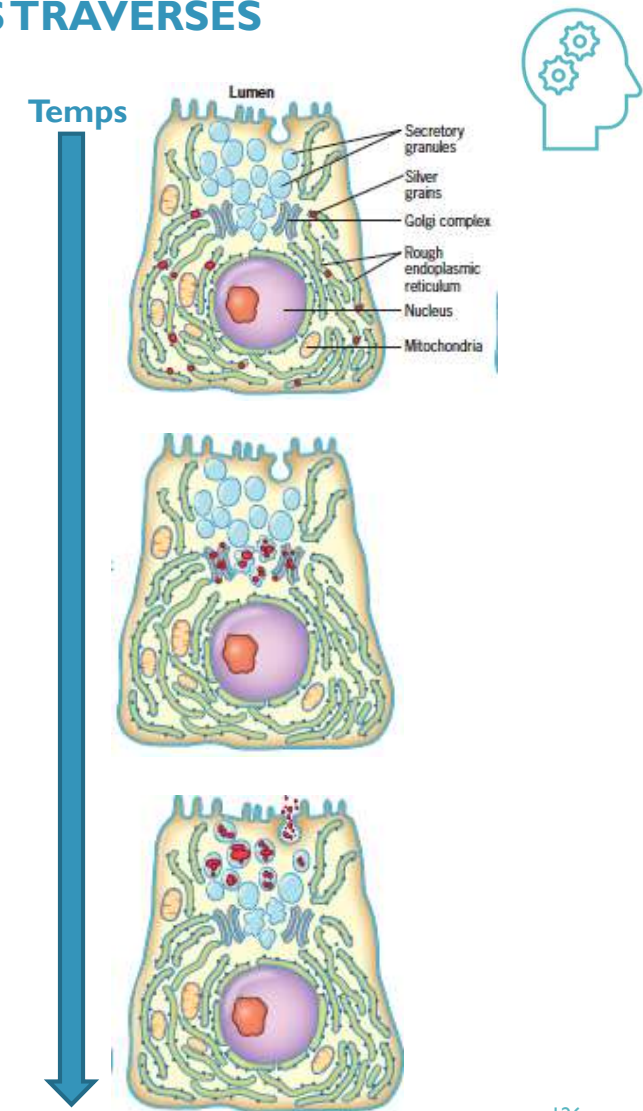
A. DES FLUX DE MATIÈRE

I. Mise en évidence d'un flux de matière

I.5. Conclusion

- L'unique site d'incorporation du marqueur **pour des protéines sécrétées** est le **REG**; les protéines sécrétées sont donc synthétisées dans le REG
- Les protéines synthétisées au niveau du REG passent par l'appareil de Golgi avant d'arriver aux vésicules de sécrétion qui se déversent dans la lumière du canalicule.
- Les protéines ne transitent pas par le cytoplasme ; le transfert d'un compartiment à l'autre doit passer par des fusions de vésicules

→ La polarité fonctionnelle se superpose à la polarité structurale : la **CAP** est traversée par un flux orienté baso-apical de matière parcourant un grand nombre de compartiments



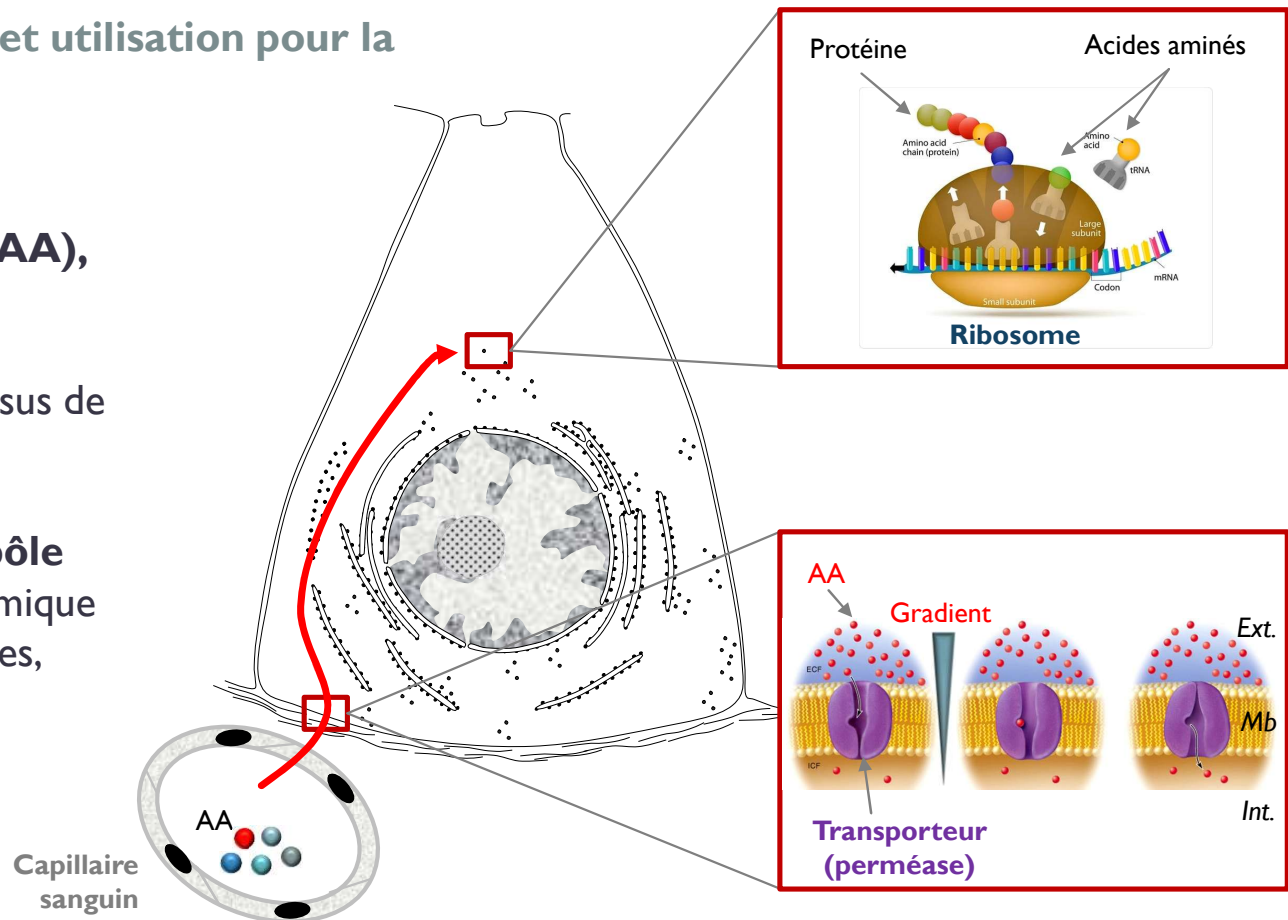
III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.1. Mobilisation de acides aminés et utilisation pour la traduction

- Les protéines sont synthétisées par **polymérisation d'acides aminés (AA)**, réalisée par les **ribosomes**
- Les AA proviennent du sang et sont issus de la digestion
- Les AA entrent dans la cellule par le **pôle basal** et traversent la membrane plasmique grâce à des **transporteurs** (perméases, diffusion facilitée)



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

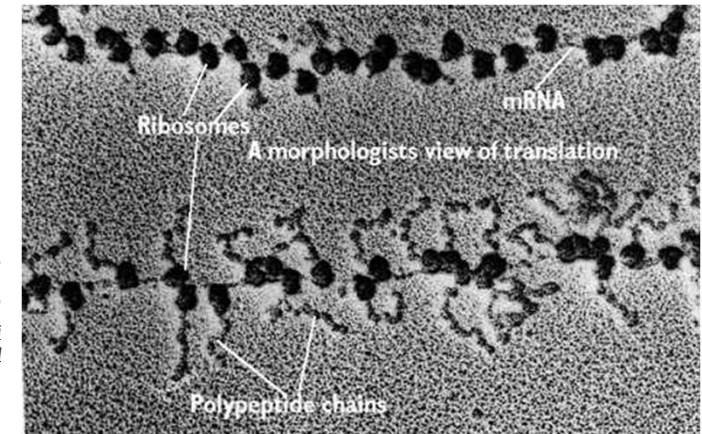
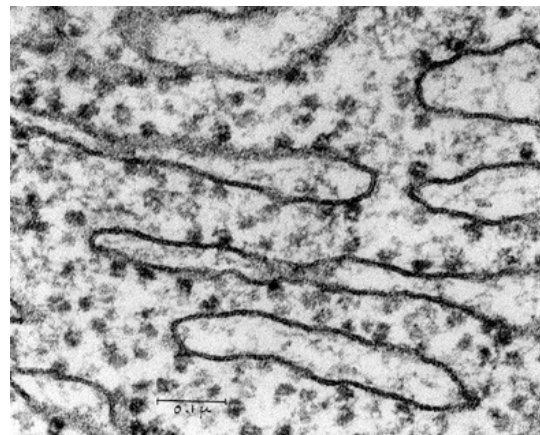


2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2. 2. Deux voies de synthèse : cytosolique et endomembranaire

- Les **ribosomes** s'assemblent sur l'ARNm et **traduisent l'information** qu'il contient - sous forme de séquence nucléotidique - en une **séquence peptidique**.
- Les ribosomes peuvent être **libres** dans le cytosol ou **attachés au REG**.
 - Début de synthèse de toutes les protéines sur des ribosomes libres
 - Si **signal d'adressage** contenu dans la séquence protéique
→ fixation du ribosome sur REG

Synthèse protéique à partir de ribosomes libres dans le cytoplasme
<http://www.sumanasingh.com/webcontent/animations/content/polyribosomes.html>



Synthèse protéique à partir de ribosomes attachés au REG
http://medcell.med.yale.edu/histology/cell_lab.php

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.2. Deux voies de synthèse : cytosolique et endomembranaire



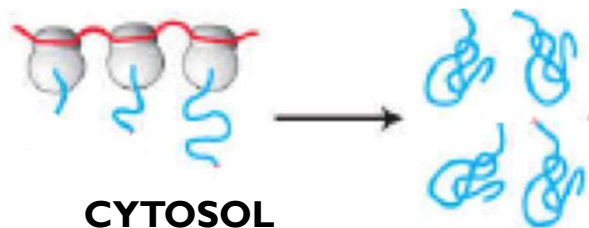
Voie cytoplasmique

Ribosomes libres dans le cytosol

→ synthèse de protéines destinées à...

- ✓ ... rester dans le **cytosol**
- ✓ ... être adressées aux organites à deux membranes (mais aussi peroxysome)

ARNm
Ribosome
polypeptide

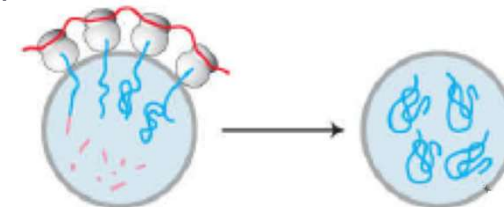


Voie endomembranaire

Ribosomes fixés au REG

→ synthèse de protéines destinées à être...

- ✓ ... localisées dans :
 - ✓ le **RE**
 - ✓ l'**appareil de Golgi**
 - ✓ le lysosome (cell animale)
 - ✓ la vacuole (cell végétale)
- ✓ ... sécrétée par exocytose vers le milieu intérieur (ex : hormone) ou extérieur (ex : enzymes digestives)



Ribosomes libres et ribosomes fixés au REG

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE



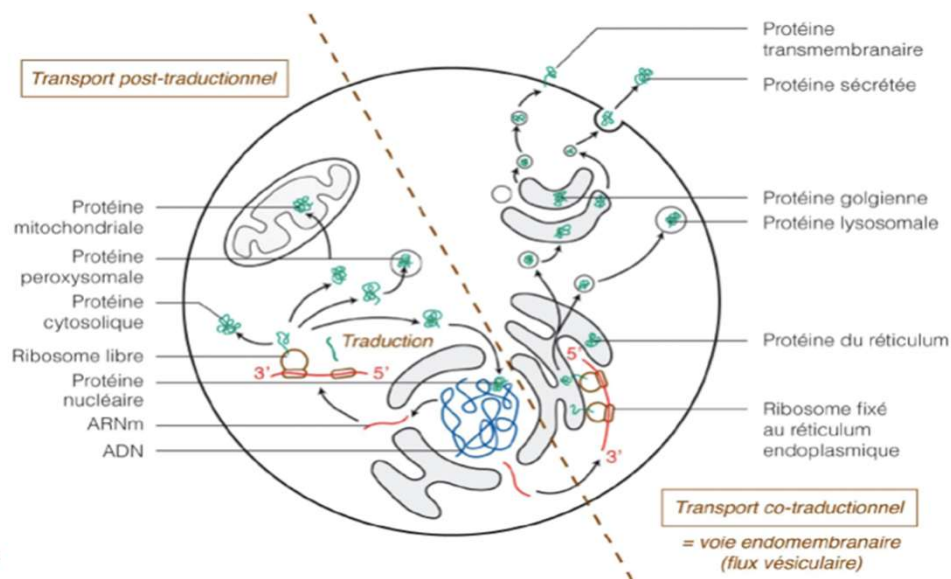
2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.2. Deux voies de synthèse : cytosolique et endomembranaire

Voie cytoplasmique

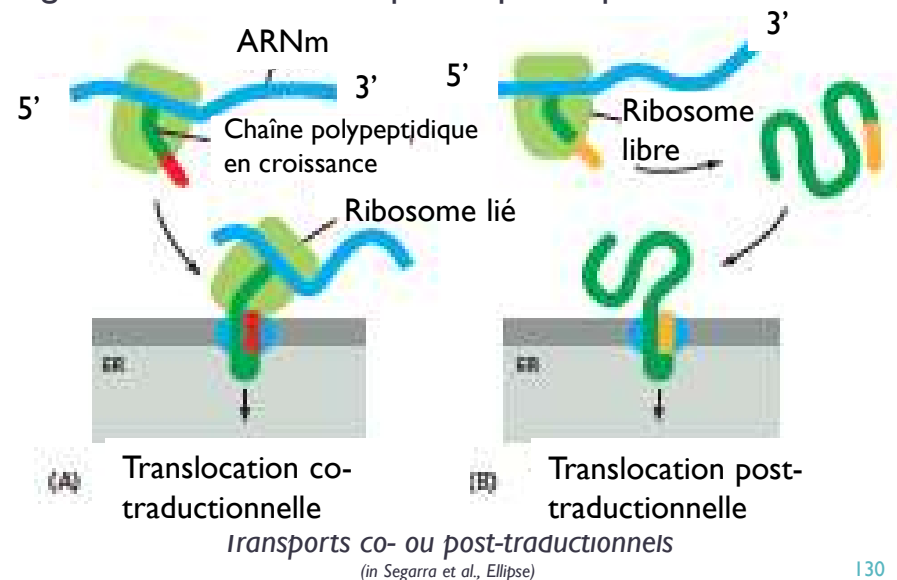
- Si transport vers les organites, il est **post-traductionnel** et **transmembranaire**

→ Localisation finale déterminée par des signaux d'adressage contenus dans la séquence protéique



Voie endomembranaire

- Transport **co-traductionnel** puis **vésiculaire**



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

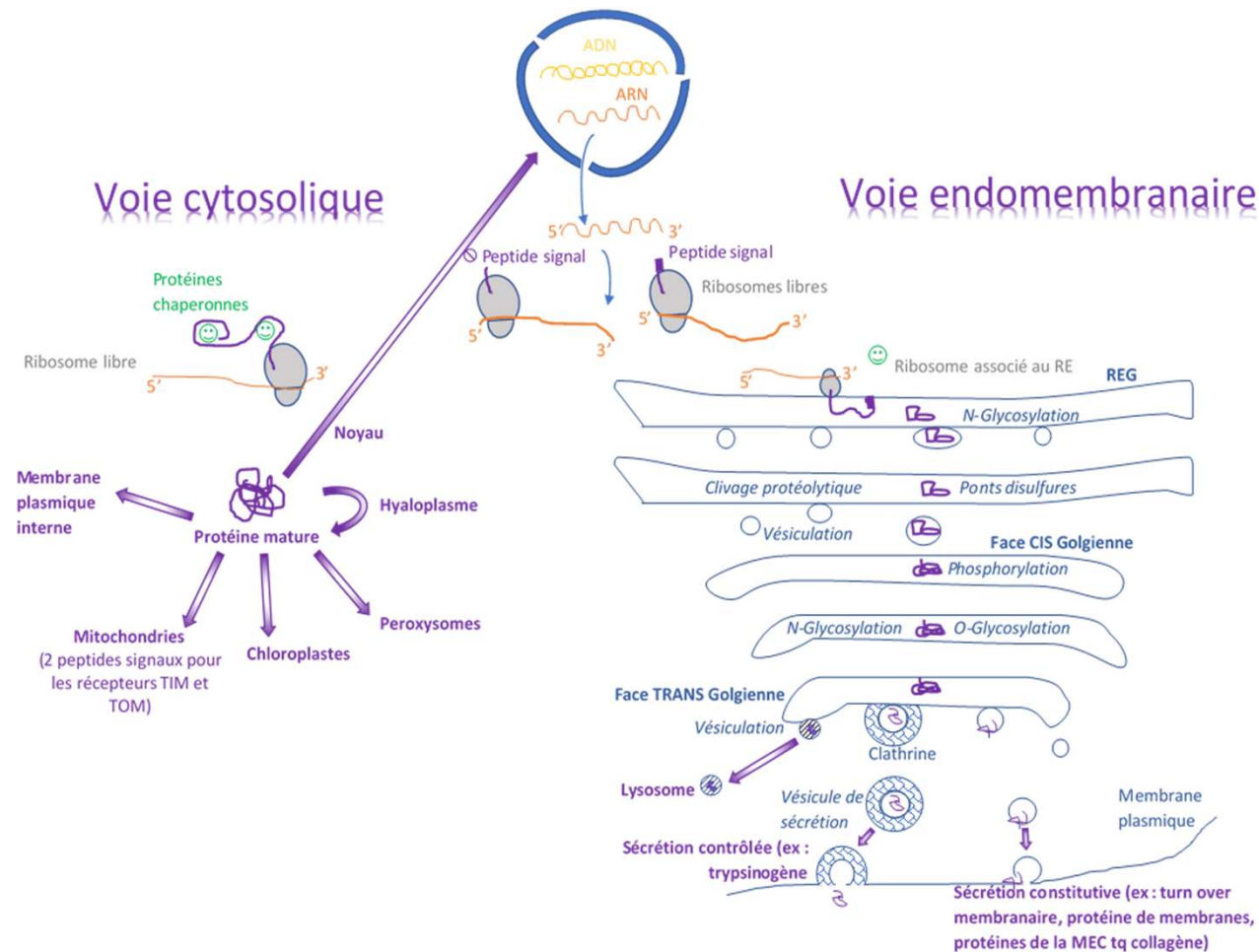
2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

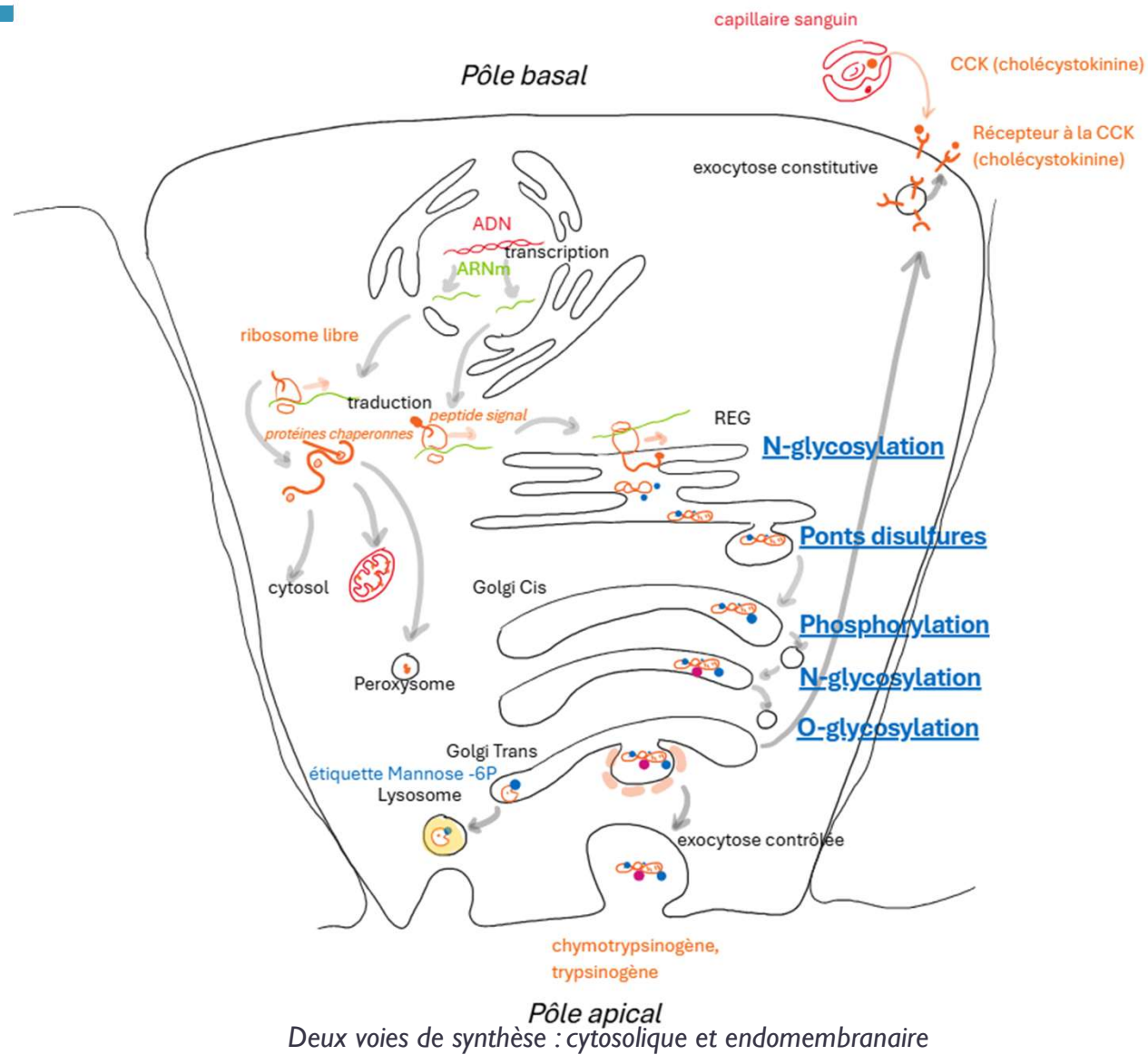
2.2. Deux voies de synthèse : cytosolique et endomembranaire

→ Deux niveaux de tri des protéines

✓ **Niveau 1** : voie cytosolique vs endomembranaire
→ Pendant la traduction

✓ **Niveau 2** : au sein de la voie cytosolique, plusieurs destinations possibles
→ Après la traduction





III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

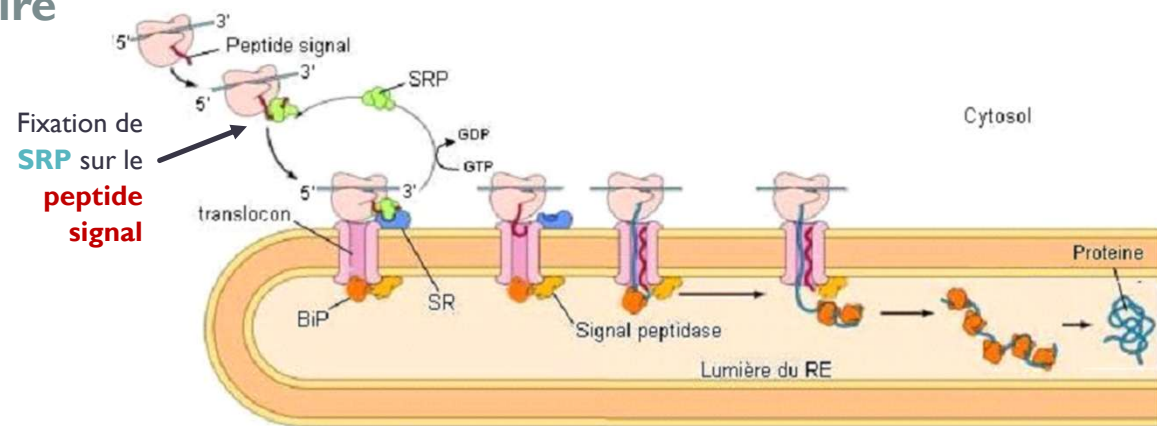
2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Translocation dans le REG : protéines solubles

- La plupart des protéines envoyées vers le RE ont une séquence signal en N-ter = **peptide signal**

- 4-12 résidus AA hydrophobes consécutifs
- clivé par la peptidase de la membrane du RE
- éliminé dans la lumière du RE

- Les protéines **solubles** sont libérées dans la lumière du RE



Fixation de SRP sur son récepteur (SR)

→ ancrage du ribosome au REG

Prise en charge de la séquence signal par le **translocon**

→ libération de SRP et poursuite de traduction

Clivage du **peptide signal** et libération de la protéine

Repliement protéique assisté par des **chaperonnes**

Translocation co-traductionnelle dans le RE d'une protéine soluble (Alberts)

Preuve expérimentale du rôle de la séquence signal :
Technique d'ADN recombinant : production d'une fusion entre le peptide signal et la GFP ou une protéine cytoplasmique
→ La protéine est dirigée vers le REG

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

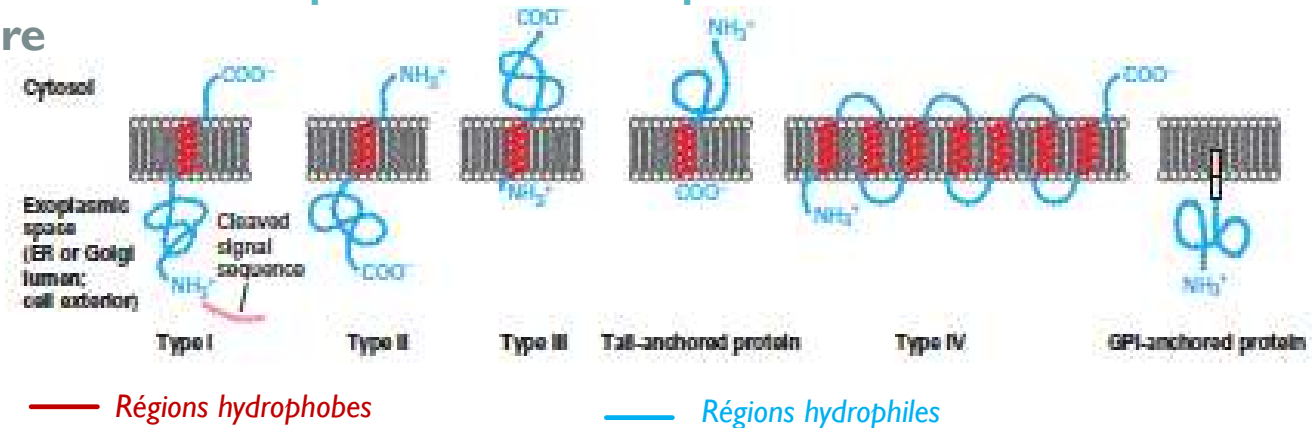
2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Translocation dans le REG : protéines membranaires

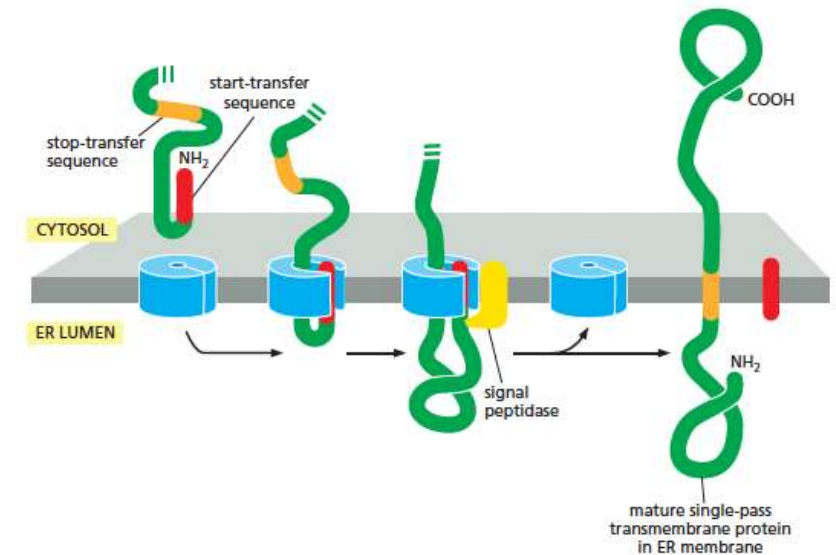
➤ Il existe différents types de protéines membranaires (1 ou plusieurs régions hydrophobes, N-ter ou C-ter vers l'ext.)

➤ Elles sont dirigées vers le REG grâce à un **peptide signal** terminal ou interne à la séquence d'AA.

➤ Elles restent enchâssées dans la membrane du RE au niveau de leurs régions hydrophobes ↔ séquence d'ancrage mais non clivée



Types de protéines membranaires



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

cf SV-D

A. DES FLUX DE MATIÈRE

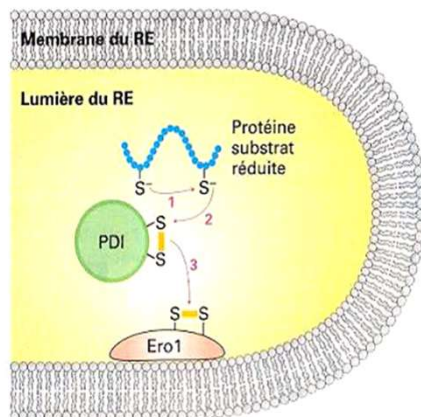
2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Repliement co-translationnel des protéines

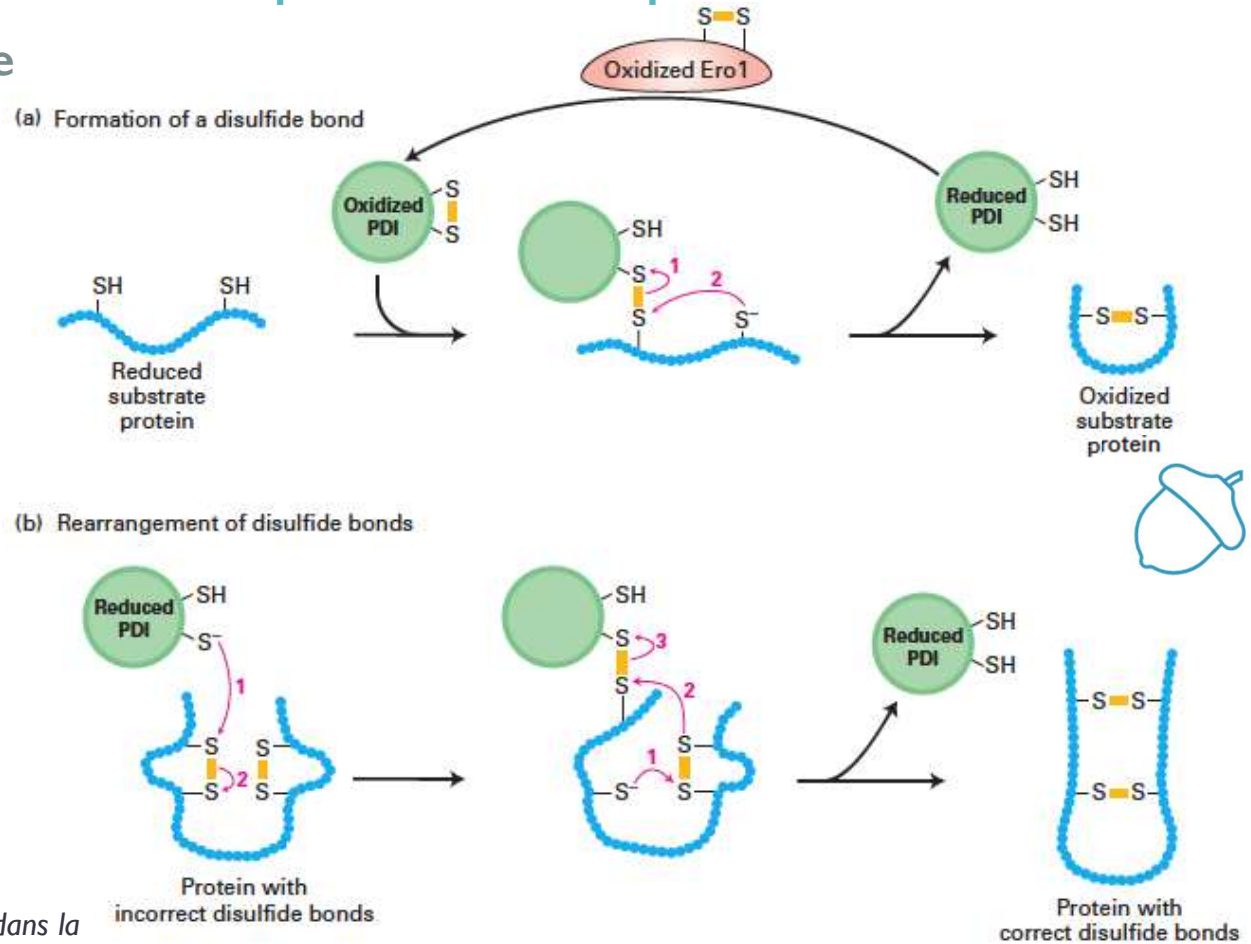
- spontané
- stabilisé par des liaisons faibles et des **ponts disulfures (Cys-Cys)**
- +/- assisté par des **protéines chaperonnes**
 - Guident le repliement de la prot,
 - empêchent repliement prématuré

■ Protéines multimériques → association post-translationnelle des monomères



Implication de la disulfure isomérase dans la formation des ponts disulfures des protéines dans le RE (cas des Eucaryotes).

BCPST I - ENCPB - S. DALAINE



Mécanisme de formation des ponts disulfures et de leurs réarrangements par la protéine disulfure isomérase (PDI) dans le RE (Lodish)

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

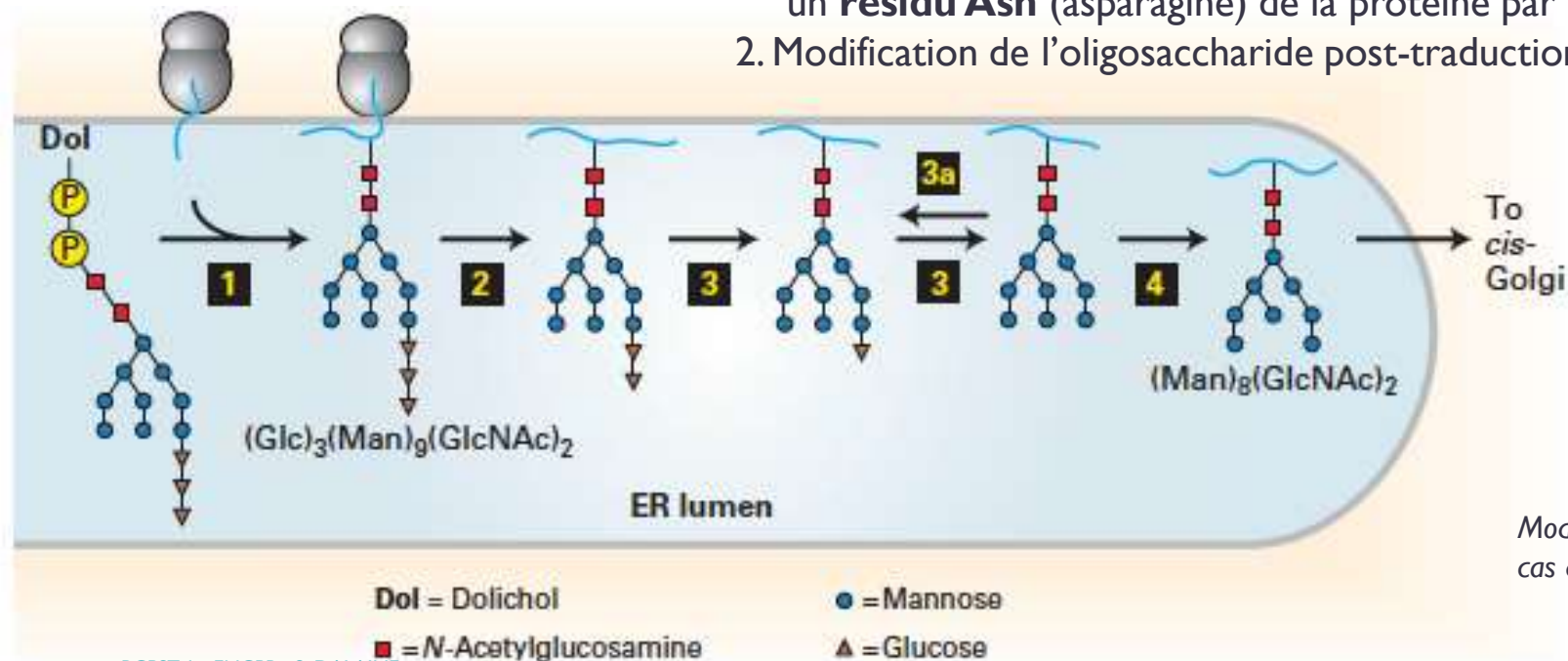
2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Glycosylation dans le REG

1. N-glycosylation co-traductionnelle

→ Transfert oligo-saccharide (sucre) depuis le dolichol (terpénoïde, lipide) vers un **résidu Asn** (asparagine) de la protéine par la glycosyltransférase

2. Modification de l'oligosaccharide post-traductionnelle



Modifications post-traductionnelles des protéines :
cas d'une N-Glycosylation (Lodish)

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

2.3.3. Dans le Golgi: la maturation et l'adressage des protéines

Glycosylation : n.f. ajout de sucres sur une protéine par liaison covalente



■ Types de glycosylation:

- N-glycosylation → sur Asn
- O-glycosylation → sur Ser, Thr

■ Rôle des glycosylations :

- Structuration même des protéines

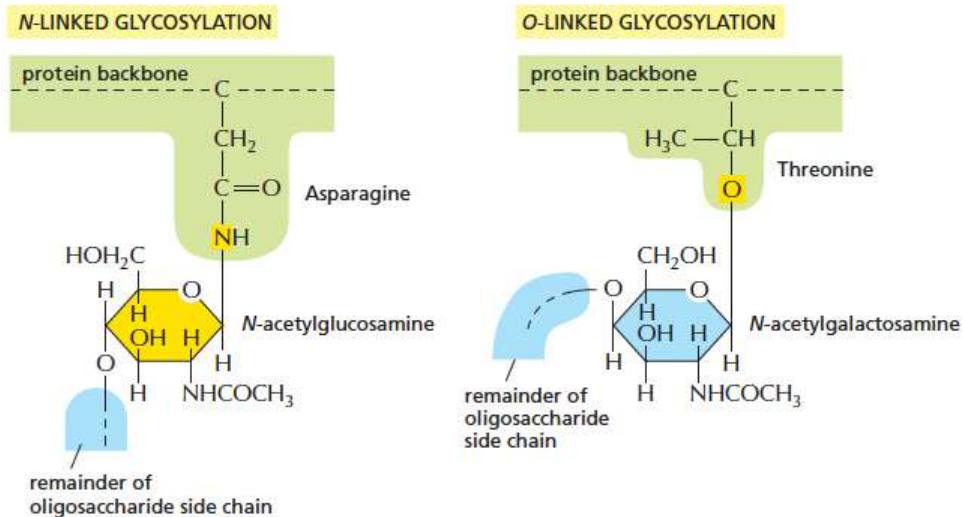
- Protection vis à vis du milieu extérieur :

Ex : protéines sécrétées dans l'intestin par la CAP →
Protection contre l'action des protéases

- Reconnaissance

Ex : groupes sanguins

Ex : ZP3 de la zone pellucide dont les oses sont reconnus par un récepteur du spermatozoïde



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

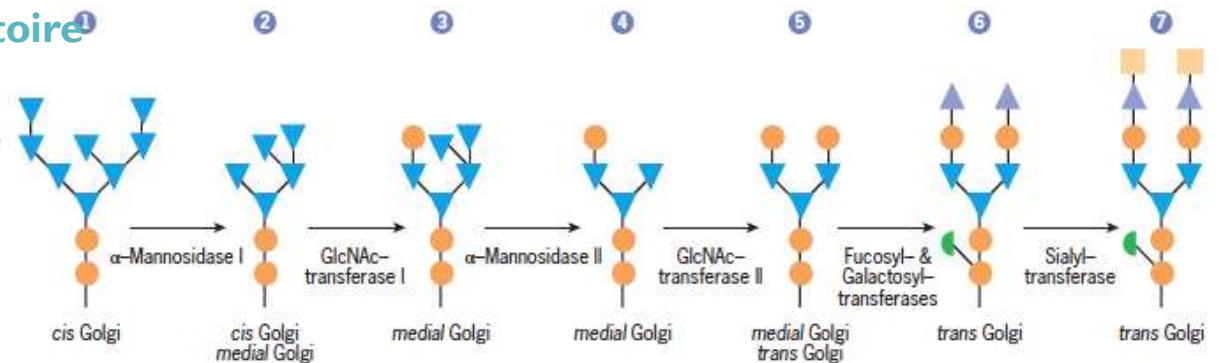
■ Glycosylation dans le Golgi

➤ Modifications de la **N-glycosylation** réalisée dans le RE :

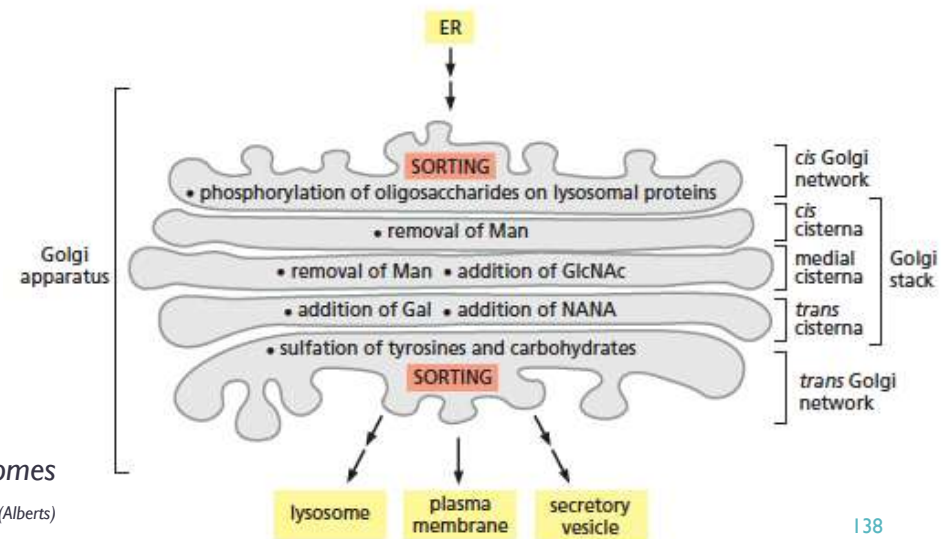
- élimination d'oses = déglycosylation
- ✓ greffe de nouveaux oses grâce à l'action d'enzymes membranaires.

➤ **O-glycosylation** (sur Ser et Thr) par des enzymes membranaires ou solubles.

➤ **Le Golgi est une chaîne de montage** ; chaque dictyosome est spécialisé dans un nombre d'étapes de déglycosylation et glycosylation.



N-glycosylation dans le Golgi (Karp)



Rôle des différents dictyosomes dans la glycosylation (Alberts)

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

cf SV-D

A. DES FLUX DE MATIÈRE

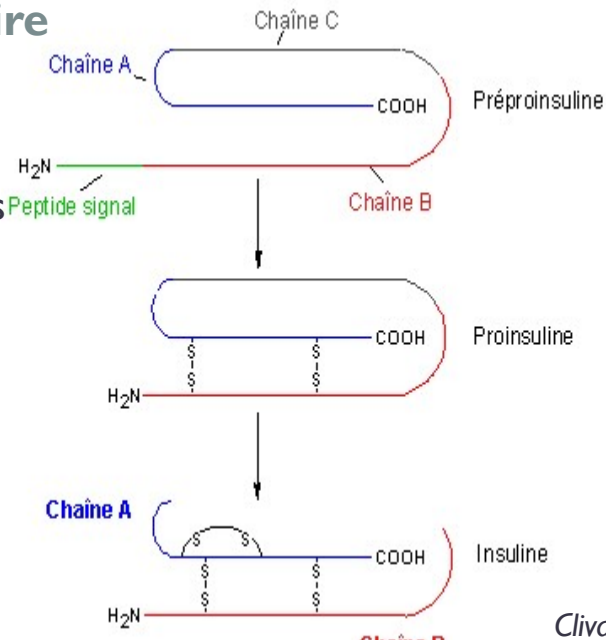
2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Clivages protéiques dans le Golgi

➤ Clivage = hydrolyse de liaisons peptidiques

- ✓ Certaines protéines nécessitent des clivages pour acquérir leur forme native active. Ex : insuline
- ✓ Certains peptides (ou protéines) sont synthétisés sous la forme d'un unique polypeptide → séparation par clivage.
Ex : Insuline, ubiquitine



REG :

- Clivage du peptide signal
- Formation des ponts disulfures

Golgi :

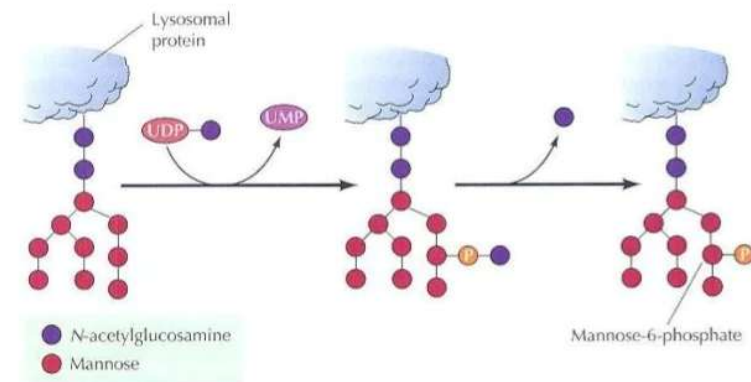
- Clivage de la pro-insuline en insuline mature + peptide C

Clivage protéique : exemple de l'insuline

■ Phosphorylation dans le Golgi

- Les protéines destinées aux lysosomes sont phosphorylées sur un résidu mannose
→ étiquette mannose-6-P
Ex: pro-cathepsine L

Phosphorylation de mannose dans le Golgi



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

cf SV-D

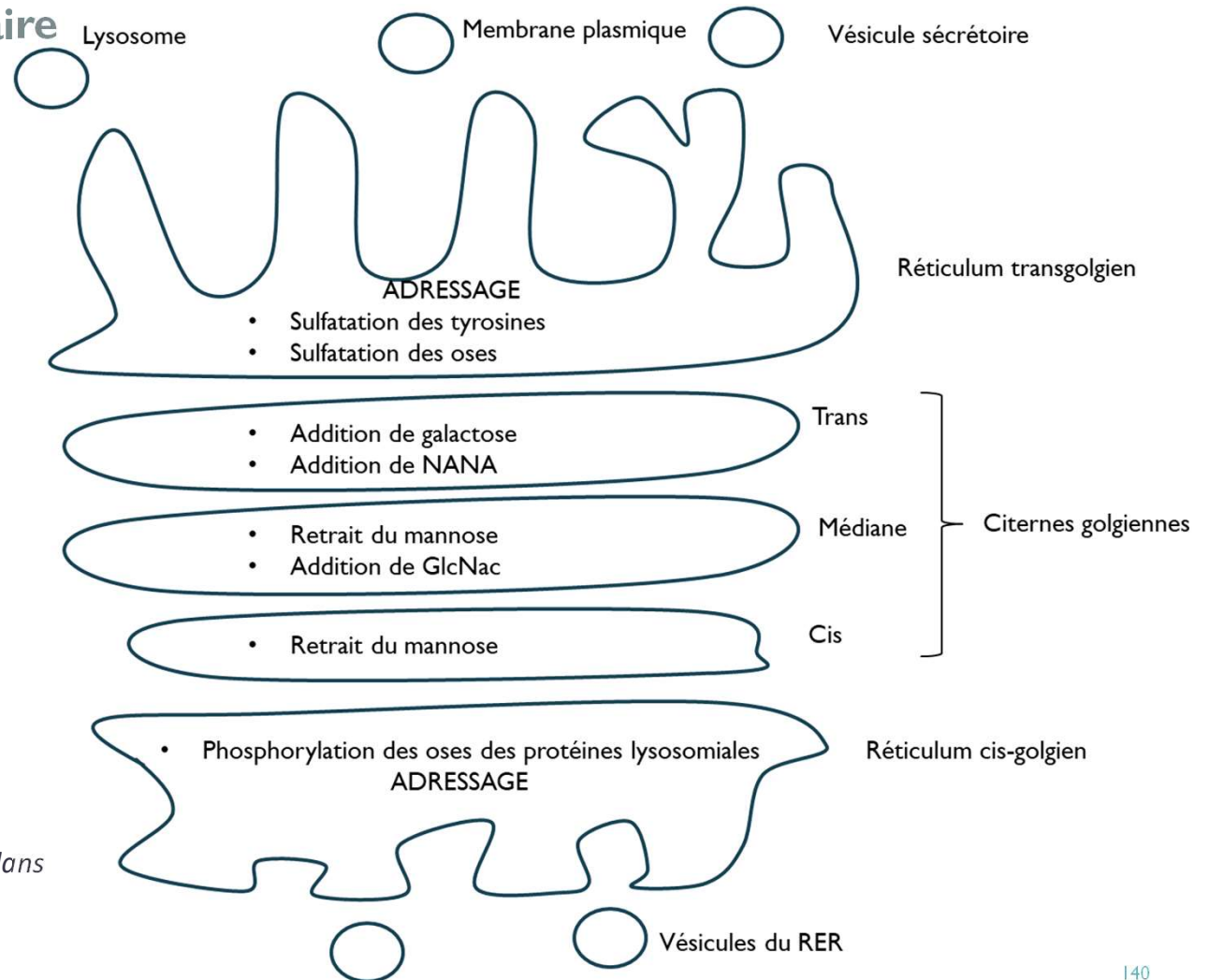
A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Phosphorylation dans le Golgi

- Les protéines destinées aux lysosomes sont phosphorylées sur un résidu mannose
→ étiquette mannose-6-P
Ex: pro-cathepsine L



Localisation des différentes activités enzymatiques dans l'appareil de Golgi (Source : Du Breuil et Tec)

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

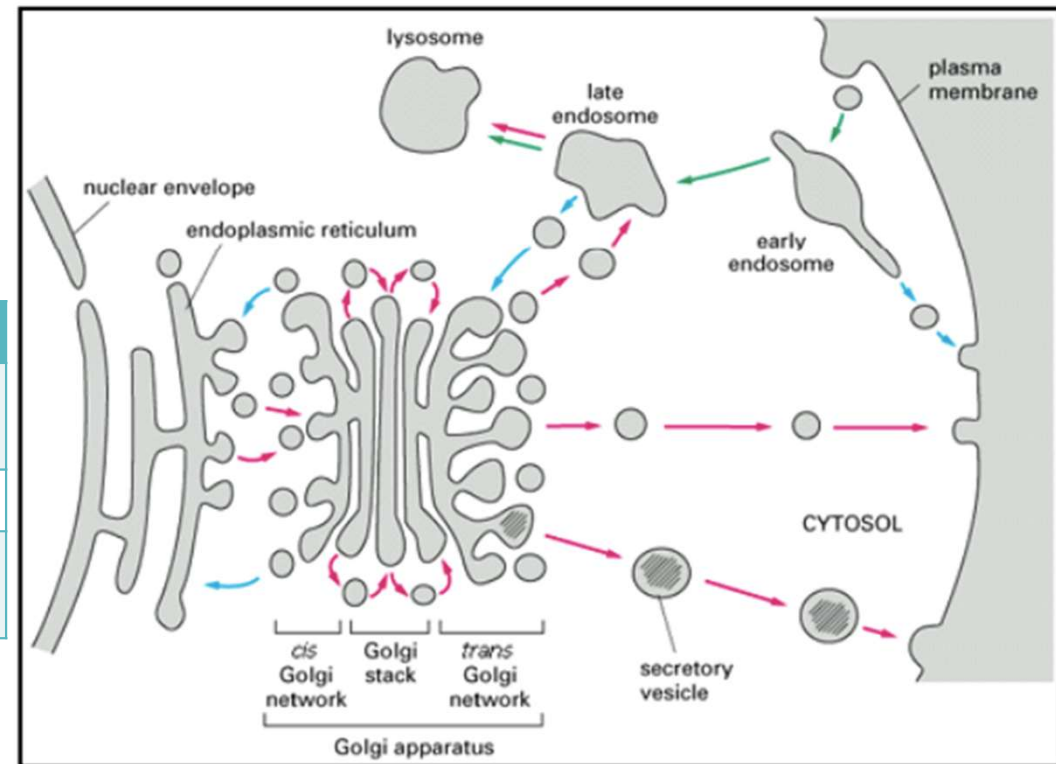
2.3. Focus sur la voie endomembranaire

■ Adressage des protéines dans le Golgi

- La face trans du Golgi communique avec plusieurs compartiments
→ Il assure l'adressage des protéines vers ces différents compartiments, en fonction de leurs « **étiquettes** »

Type d'étiquette	Adressage vers
Aucune	Membrane plasmique → sécrétion constitutive = turn-over
Mannose-6-P	Lysosome
Sucres complexes	Membrane plasmique → sécrétion provoquée

- Pour les étiquettes glucidiques :
 - ✓ Présence de récepteurs membranaires spécifiques
 - ✓ A saturation → formation d'une vésicule recouverte de clathrine



Différentes voies possibles à la sortie du trans-Golgi (Alberts)

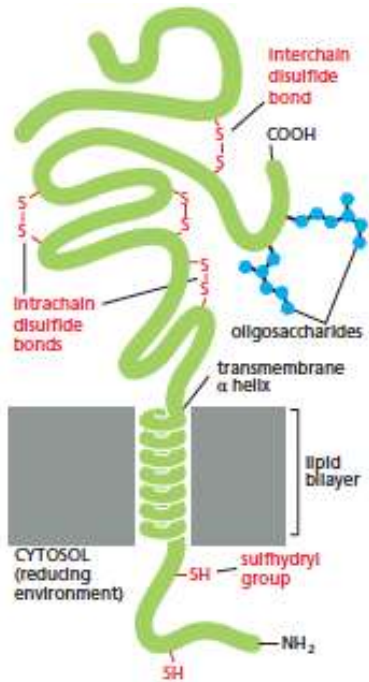
III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE

2. Les principales étapes du processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

2.3. Focus sur la voie endomembranaire

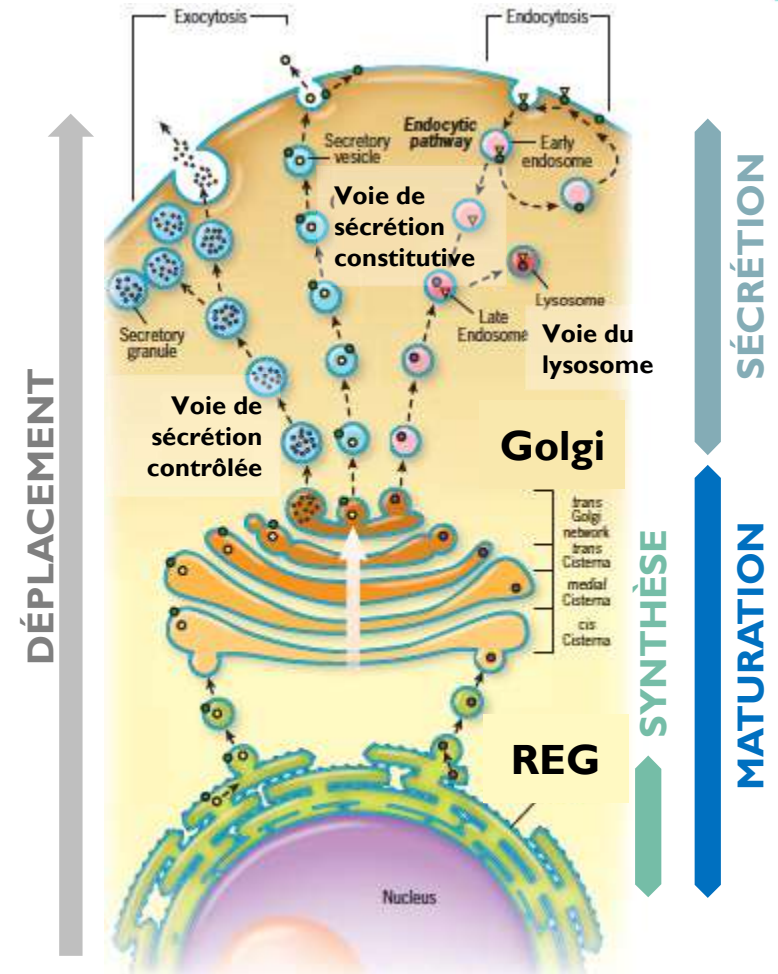
BILAN : Maturation et adressage des protéines



Types de modifications subies par les protéines au sein du RE et Golgi
(Alberts)

- Certaines modifications sont définitives et ont vocation structurale (ex : glycosylations).
- La plupart des autres sont réversibles, et participent à la modulation de l'activité biologique de la protéine (ex: phosphorylation)
- Le flux de matière qui traverse la CAP est étroitement associé au flux membranaire qui anime la cellule
 - complémentarité fonctionnelle entre différents compartiments
 - Importance de la fluidité membranaire et du flux vésiculaire, guidé par le cytosquelette

Complémentarité de RE et du Golgi dans la maturation et l'adressage des protéines (Karp)



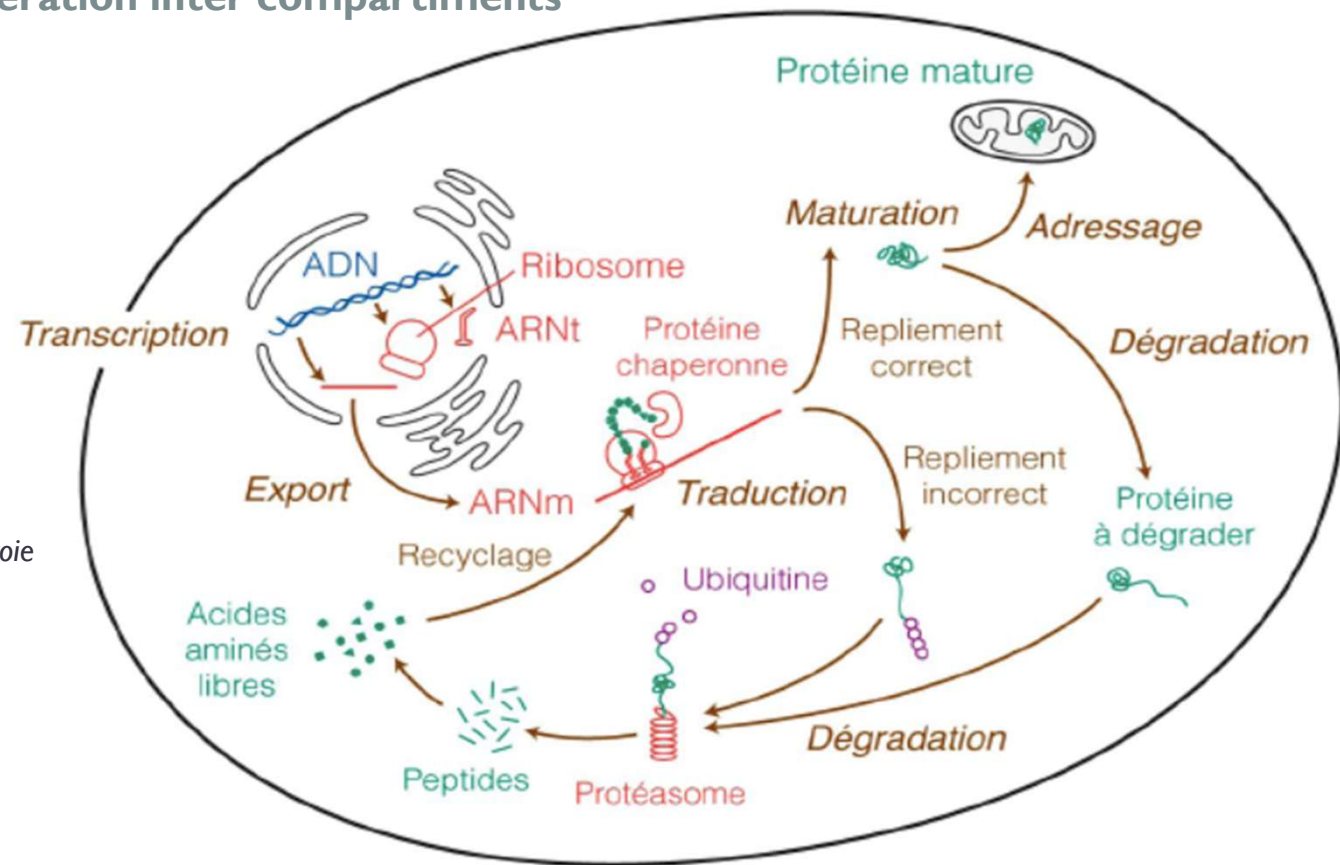
III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

A. DES FLUX DE MATIÈRE



Processus sécrétoire et la coopération inter compartiments

Schéma bilan : synthèse protéique et voie cytosolique (Segarra et al., Ellipse)



SV-C-2 Organisation fonctionnelle de la cellule

PLAN DU COURS

I. Les cellules : des unités autonomes plus ou moins compartimentées délimitées par une membrane plasmique

- A. Les cellules procaryotes : des cellules peu ou pas compartimentées délimitées par une ou deux membranes
 - 1. Organisation d'une cellule procaryote : exemple des bactéries
 - 2. Une compartimentation possible associée à une régionalisation du fonctionnement cellulaire
- B. Les cellules eucaryotes : des cellules compartimentées
 - 1. Le noyau : stockage et expression de l'information génétique
 - 2. Le réseau endomembranaire : renouvellement des constituants cellulaires et interactions avec le milieu extracellulaire
 - 3. Les lysosomes
 - 4. Les peroxysomes
 - 5. Les vacuoles
 - 6. Les mitochondries : organites semi-autonomes au cœur du catabolisme oxydatif
 - 7. Les chloroplastes : organites semi-autonomes à fonction photosynthétique chez les cellules chlorophylliennes
- C. Conséquences de la compartimentation cellulaire

II. Le cytosquelette : armature protéique de la cellule impliquée dans sa structure et sa dynamique

- A. Les éléments du cytosquelette chez les cellules eucaryotes
 - 1. Les microfilaments d'actine
 - 2. Les filaments intermédiaires
 - 3. Les microtubules
 - 4. L'importance du cytosquelette dans la migration des cellules animales

B. Des protéines homologues au cytosquelette eucaryote chez les bactéries

III. Les cellules : des systèmes thermodynamiques ouverts traversés par des flux

- A. Des flux de matière
- B. Des flux d'information
- C. Des flux d'énergie



III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

B. DES FLUX D'INFORMATION

I. Flux d'information au sein d'une cellule eucaryote

- **Depuis le noyau vers le cytosol :**
 - Transport de l'information génétique
 - ✓ ADN > ARNm > protéine
 - ✓ Séquence de nucléotides > séquence d'AA
- **Depuis le milieu extracellulaire vers le cytosol :**
 - Voie de signalisation depuis le stimulus jusqu'à la sécrétion
 - ✓ Réception > transduction > réponse
 - ✓ Stimuli : ACh, CCK (Cholécystokinine) ou PZ (Pancréozymine)
 - ✓ Transduction par IP₃/Ca²⁺

LÉGENDE

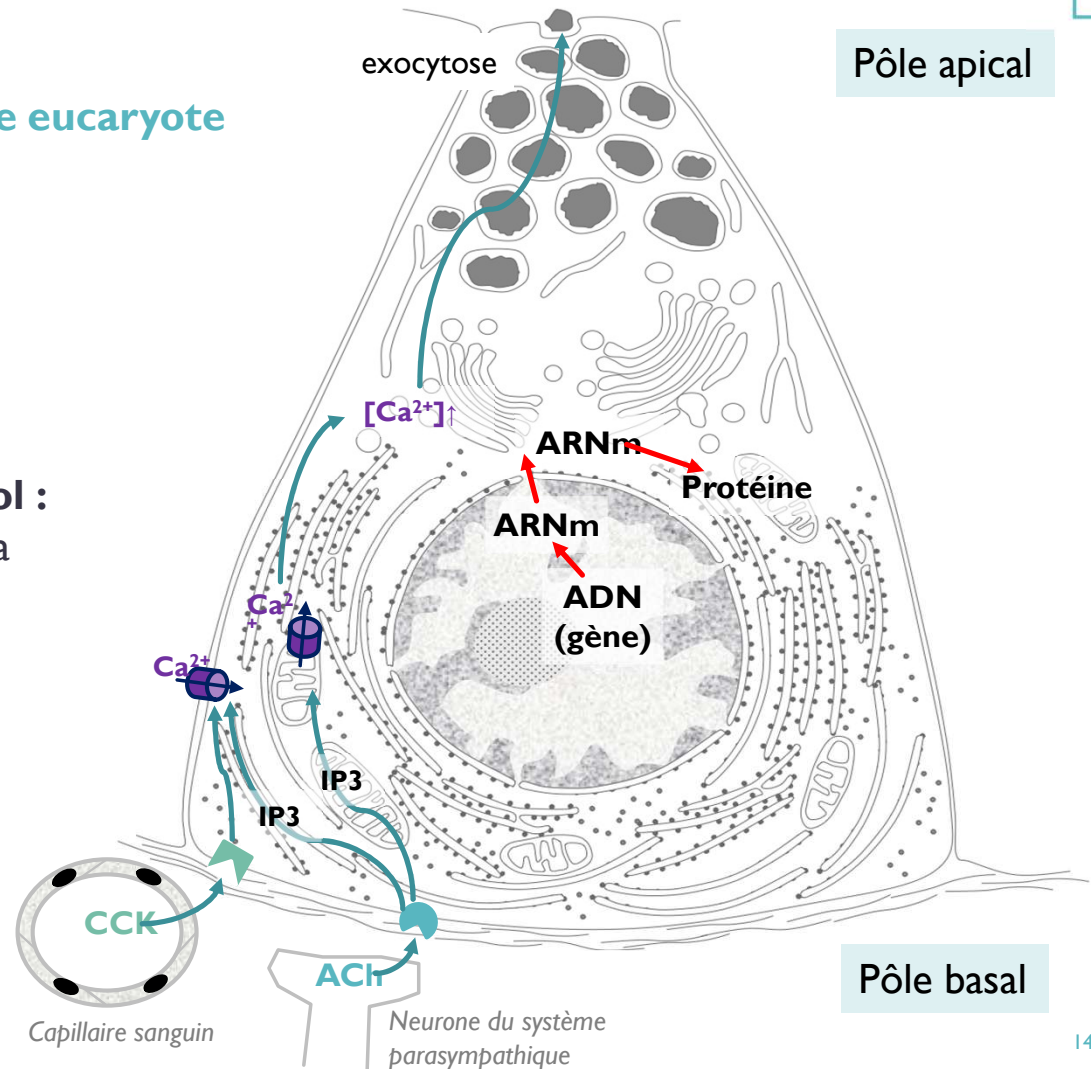
Flux d'information :

→ Depuis le noyau

→ Depuis l'extérieur

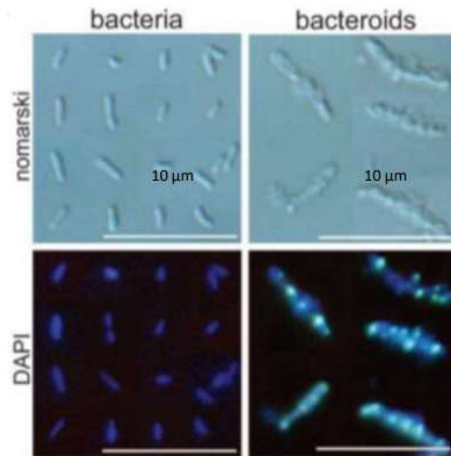
● Récepteur ACh

● Récepteur CCK



B. DES FLUX D'INFORMATION

2. Flux d'information entre pluricellulaires et procaryotes

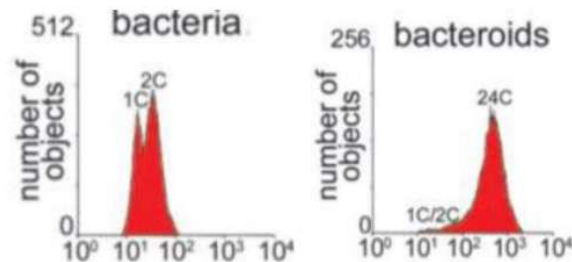


Des bactéries du genre *Rhizobium* libres (bactéria) ou présentes dans les nodosités d'une Fabacée (bactéroïdes) sont observées au microscope à contraste de phase (Nomarski) ou au microscope à épifluorescence après coloration au DAPI. Le DAPI est un agent intercalant, se liant aux bases azotées de l'ADN et qui fluoresce dans le bleu quand il est éclairé par les UV. La fluorescence émise par les cellules est proportionnelle à la quantité d'ADN qu'elles possèdent.

L'observation des bactéries isolées au MO à contraste de phase (Nomarski) révèle des organismes unicellulaires d'un µm de forme allongée (bacille), et la présence de bacilles en cours de duplication (au centre de l'image). Lorsque ces bactéries sont incorporées aux nodosités de la Fabacée, on ne distingue plus une bactérie isolée mais une structure allongée 5 fois plus longue que la bactérie isolée et 2 à 3 fois plus épaisse, d'où cette nomination bactéroïde.

Ce changement structural s'accompagne-t-il d'une réplication du chromosome bactérien?

Les résultats de fluorescence par coloration au DAPI révèlent du bleu tout le long de la structure du bactéroïde. Il semblerait que cette super structure bactérienne soit accompagnée d'une réplication intense de l'ADN bactérien.



La quantité d'ADN que présente dans leur cytoplasme chaque bactérie ou bactéroïde est observée et relevée pour un grand nombre de bactéries :

1C : signifie que chaque bactérie présente un génome haploïde

2C : représente une bactérie ayant répliqué son ADN.

Dans l'analyse quantitative des bactéries isolées, on constate un pic révélant un génome haploïde, et un autre 2C révélant un génome diploïde; les bactéries sont en cours de division (il y a 10 fois plus de bactéries en division que de bactéries simples).

Ainsi, les analyses quantitatives d'ADN dans le cytoplasme des bactéries libres vs intégrées aux nodosités des Fabacées, confirme la réplication intense du chromosome bactérien au sein des super structures que sont les bactéroïdes.

En revanche, dans le cas des bactéroïdes, on constate un seul pic 24C à 10². On en déduit que les bactéroïdes sont une bactérie transformée, sans division cellulaire, avec agrandissement de l'organisme et réplication en 24 exemplaires du chromosome bactérien ($\sqrt[24]{24} = 5$ soit presque 5 cycles de réplication), ces bactéries ont donc quintuplé de taille.

III. LES CELLULES : DES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES OUVERTS TRAVERSÉS PAR DES FLUX

C. DES FLUX D'ÉNERGIE

- Pour assurer son fonctionnement, la cellule produit et consomme de l'énergie sous forme d'ATP

- **Les sources énergétiques d'ATP**

- **Voie cytosolique**

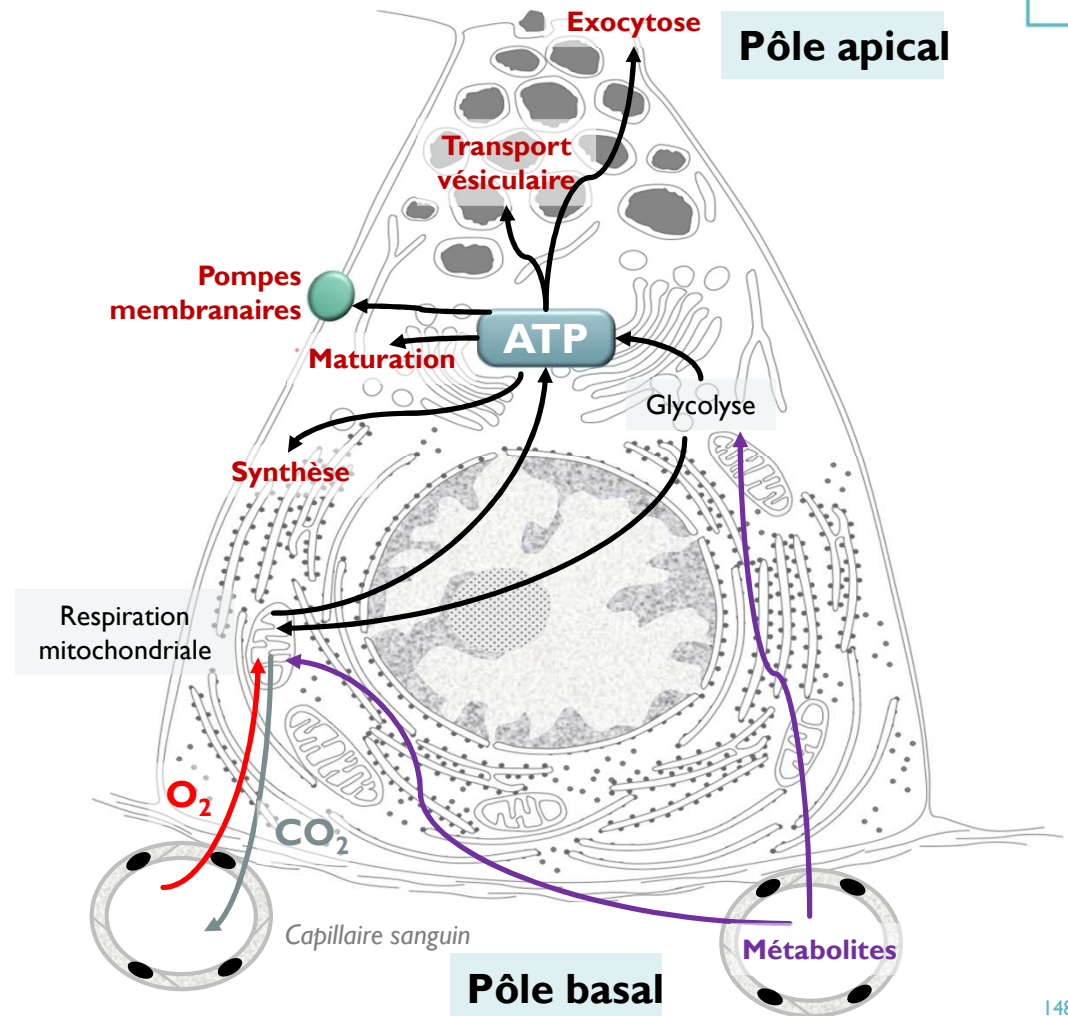
- Glycolyse : 1 glucose → 2 ATP

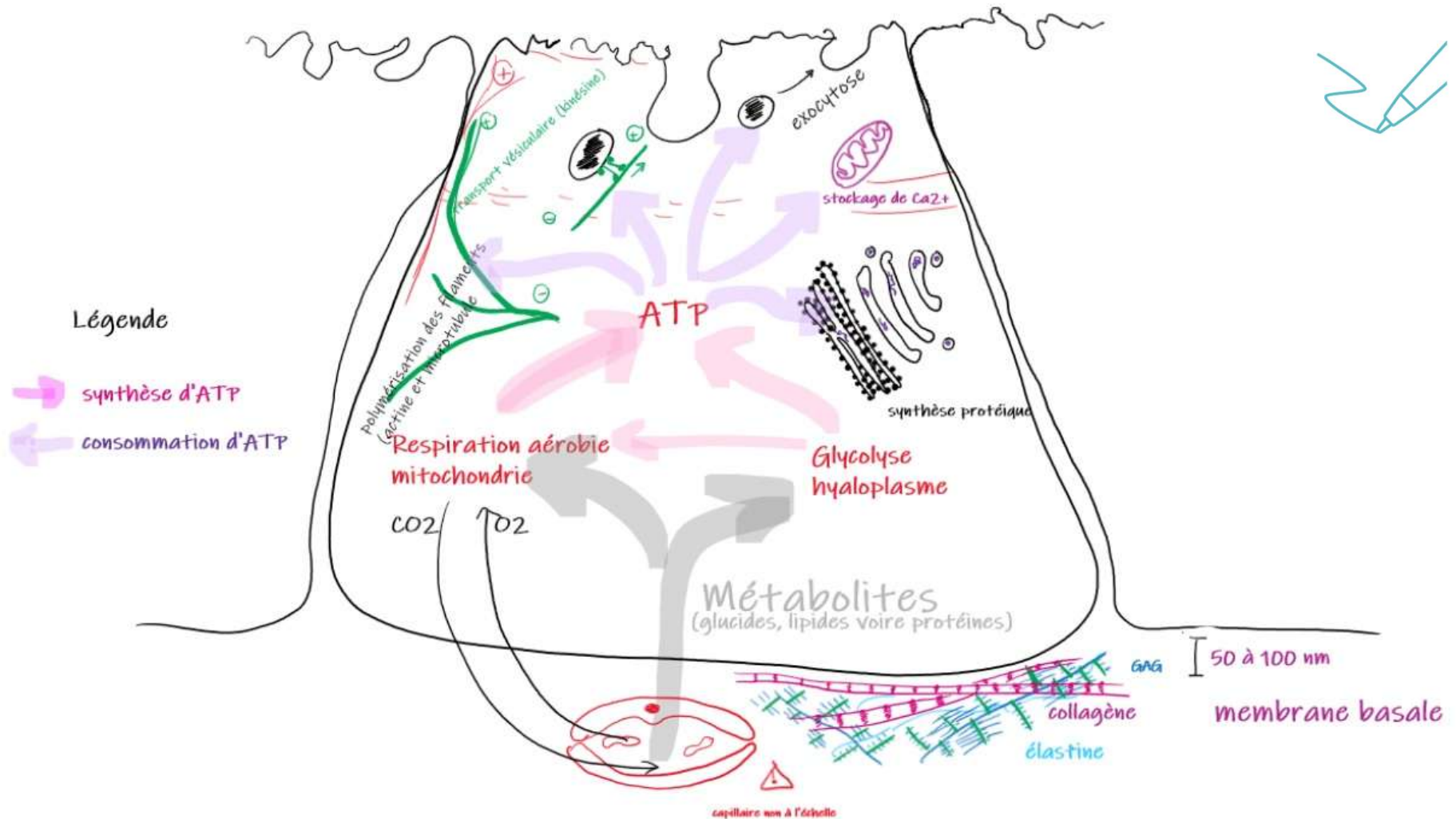
- **Voie mitochondriale**

- Métabolisme respiratoire : pyruvate → 34 ATP

- **Les sites de consommation d'ATP (travaux cellulaires) :**

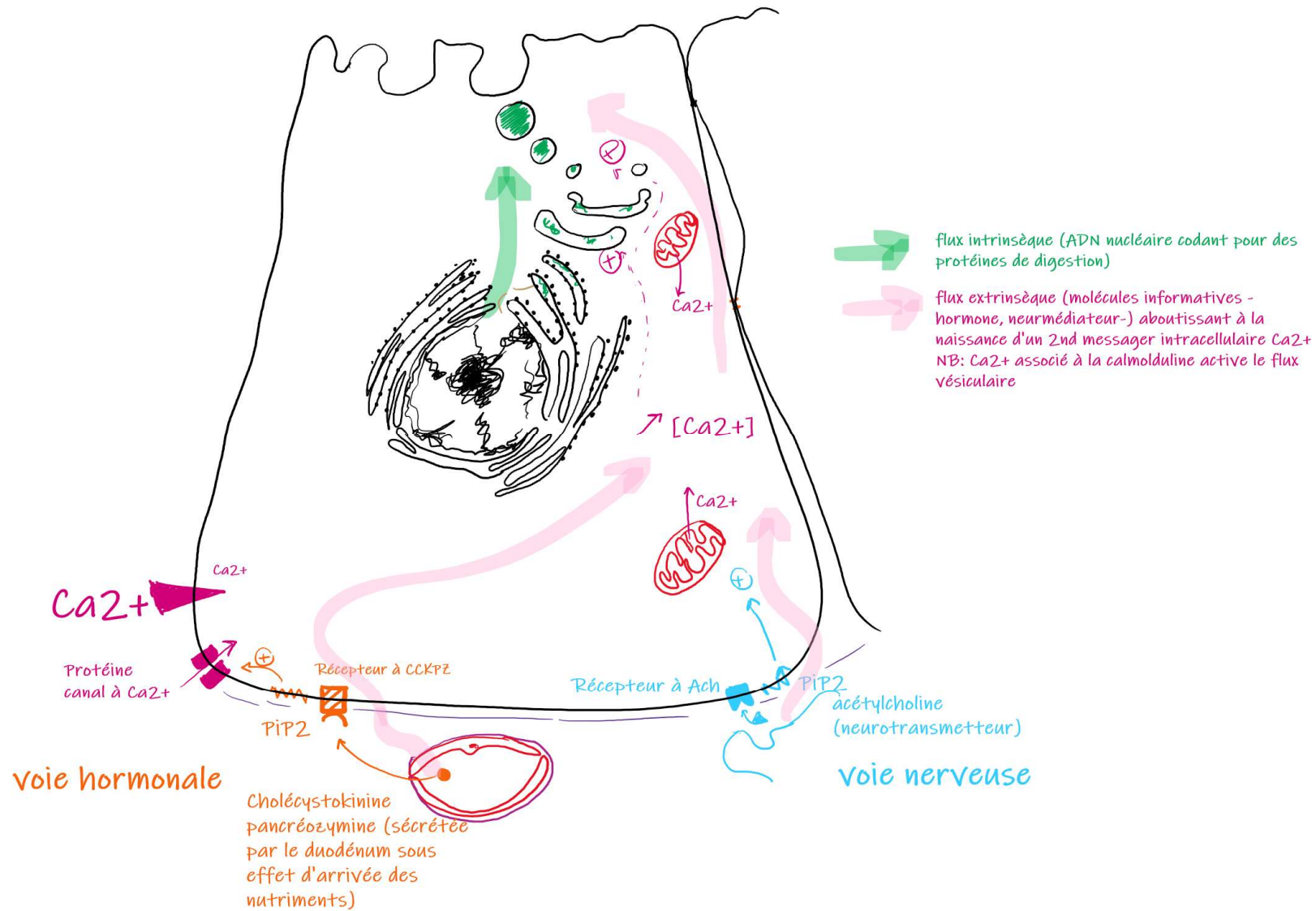
- Maturation et biosynthèse protéique (ATP vers noyau, REG et Golgi)
 - Pompes membranaires ATP-dépendantes à Ca^{2+} (memb. plasm. et mitochondrie) et à Na^+/K^+ (memb. plasm.)
 - Transport vésiculaire
 - Exocytose





Flux d'énergie au sein de la cellule acineuse pancréatique S. Dalaine

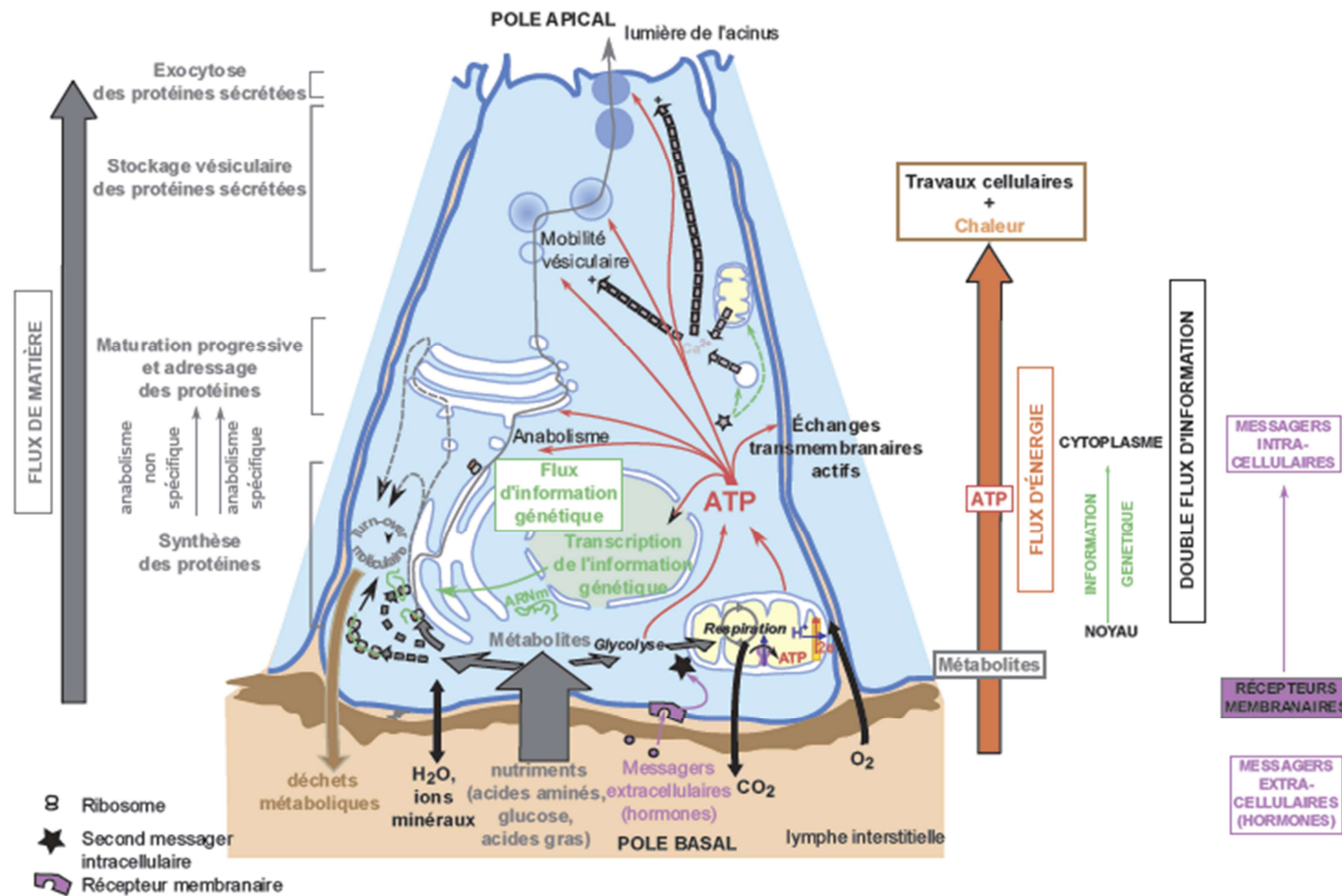
Flux d'information au travers de la CAP S. Dalaine



Flux de matière, d'énergie et d'informations

La CAP est traversée par des flux de matière, d'informations et d'énergie
 → Polarisation structurale et fonctionnelle

BILAN



Bilan général

A l'issue de ce chapitre SV-C-2 ,
vous êtes désormais en mesure
de traiter un grand nombre de
sujets relatifs aux eucaryotes et
procaryotes. Entraînez-vous à
l'aide de la liste des sujets
d'oraux.



ORaux D'ENTRAINEMENT

- Une cellule (au choix)
- Une cellule (au choix) : étude structure - fonction
- L'organisation de la cellule eucaryote
- Qu'est-ce qu'une cellule ?
- Comparer deux cellules (au choix)
- Cellule eucaryote/cellule procaryote
- Compartimentation et division du travail au sein de la cellule
- Compartimentation et spécialisation des cellules
- La compartimentation cellulaire des eucaryotes
- Le cytosquelette dans la cellule animale
- Comparaison cellule animale/cellule végétale