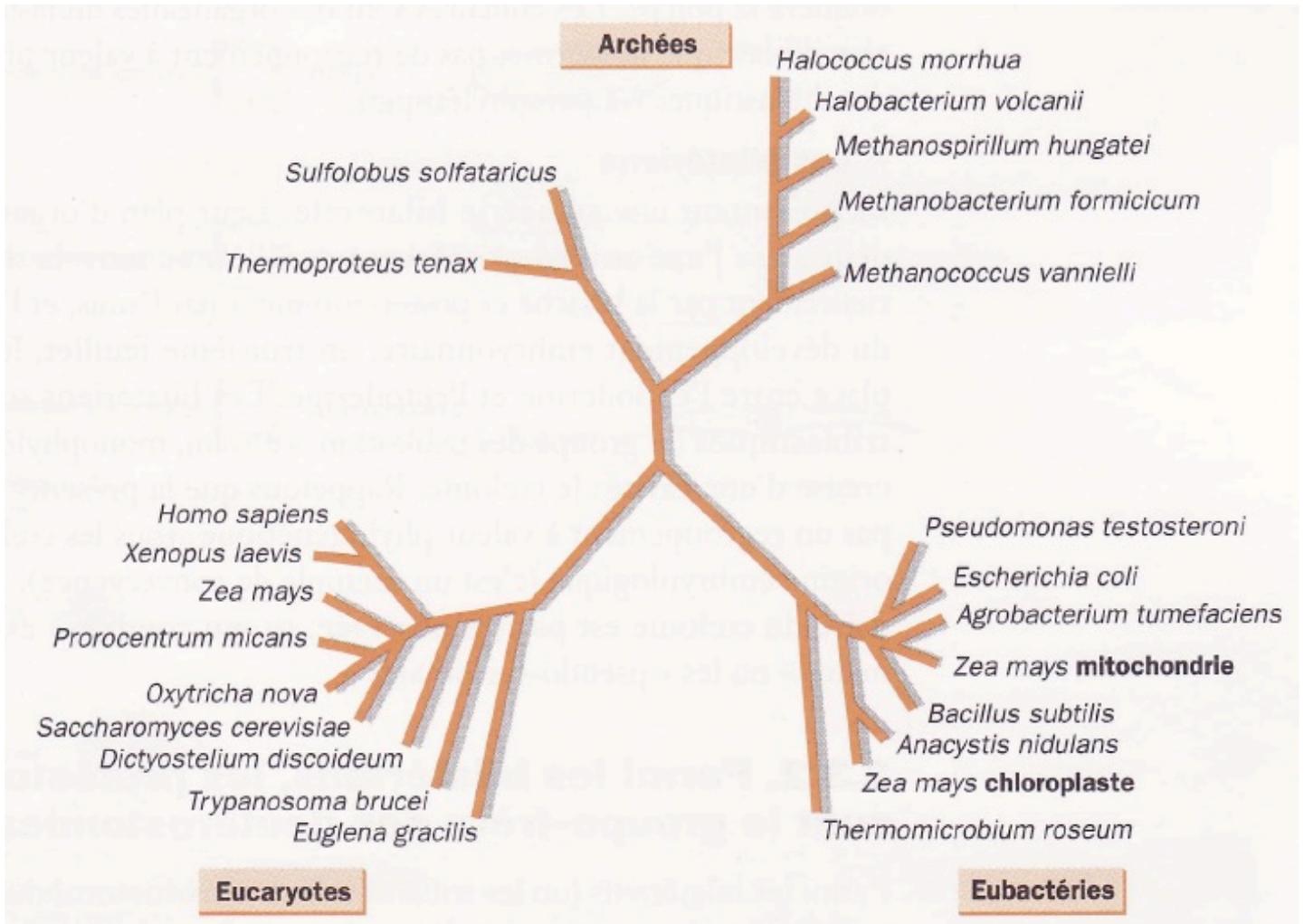


**FIGURE 1 – ORIGINE ET DIVERSITE DES CELLULES DU VIVANT****PHYLOGENIE MOLECULAIRE DU VIVANT BASE SUR L'ANALYSE DE L'ARN RIBOSOMIQUE 16S/18S**

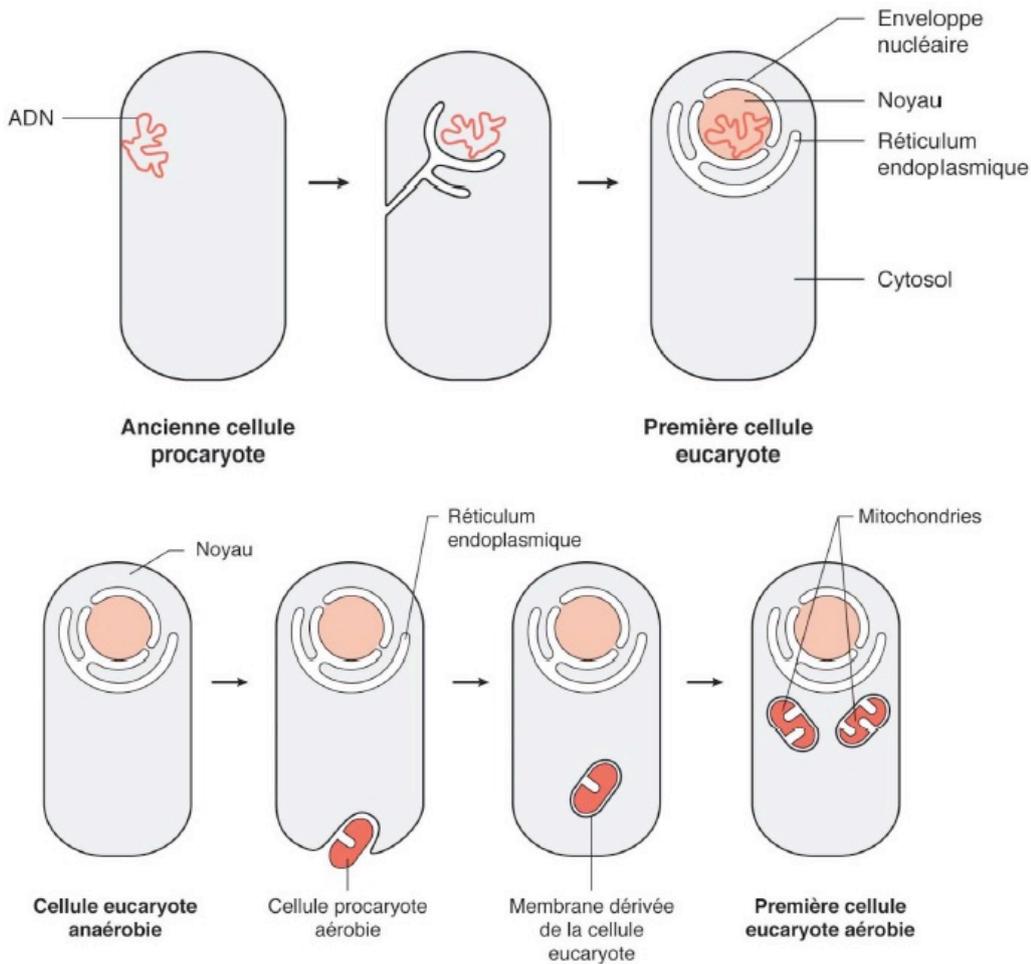
Le vivant est organisé en 3 groupes monophylétiques : les **Eubactéries**, ou **Bactéries** / les **Archées** / les **Eucaryotes**. Les procaryotes regroupent les Eubactéries et les Archées. (*Lecoindre*)

Il est admis que l'ensemble des êtres vivants actuels dérive d'un ancêtre commun nommé LUCA (Last Universal Common Ancestor).



Mitochondries et chloroplastes sont positionnés dans le groupe des Eubactéries : la **mitochondrie** est rapprochée d'une **Protéobactérie** (*Agrobacterium*) et le **chloroplaste** d'une **Cyanobactérie** (*Anacystis*). C'est un argument en faveur de **l'origine endosymbiotique** de ces structures cellulaires : la mitochondrie est probablement issue d'une Protéobactérie hétérotrophe et le chloroplaste d'une Cyanobactérie par des endosymbioses.

## UN SCENARIO DE L'ENDOSYMBIOSE A L'ORIGINE DES MITOCHONDRIES

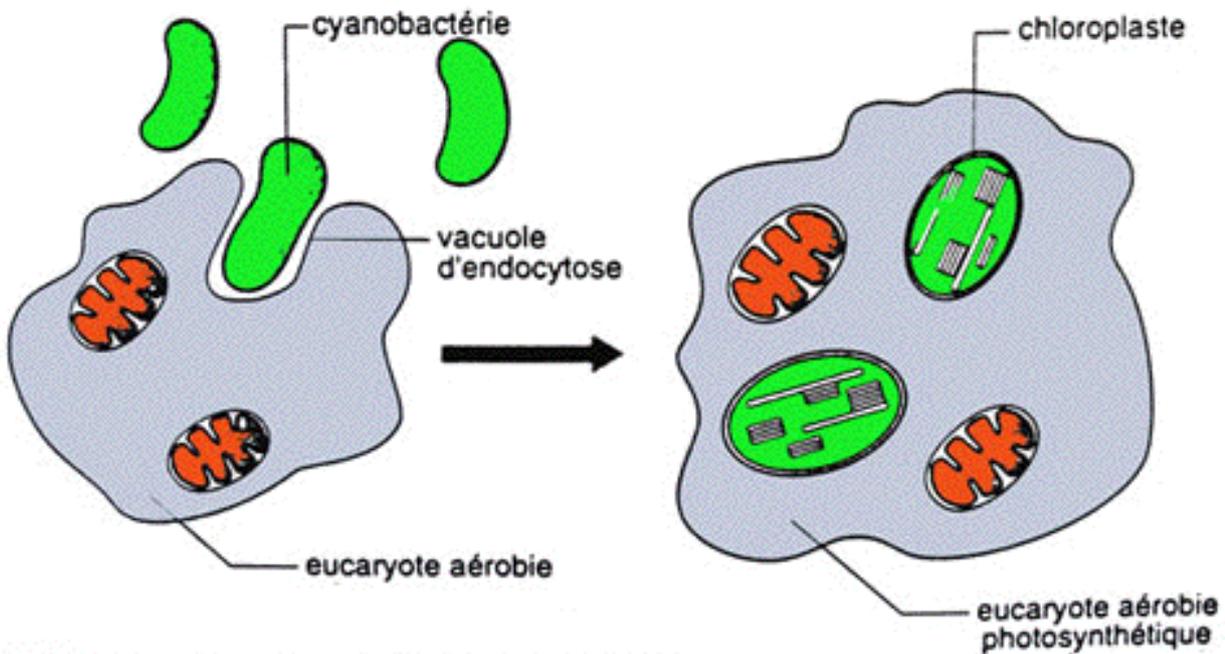


(Segarra et al 2014)

L'endosymbiose de bactéries aérobie a probablement eu lieu chez une cellule eucaryote « primitive » qui possédait déjà un noyau et du réticulum endoplasmique (provenant de replis de la membrane plasmique).

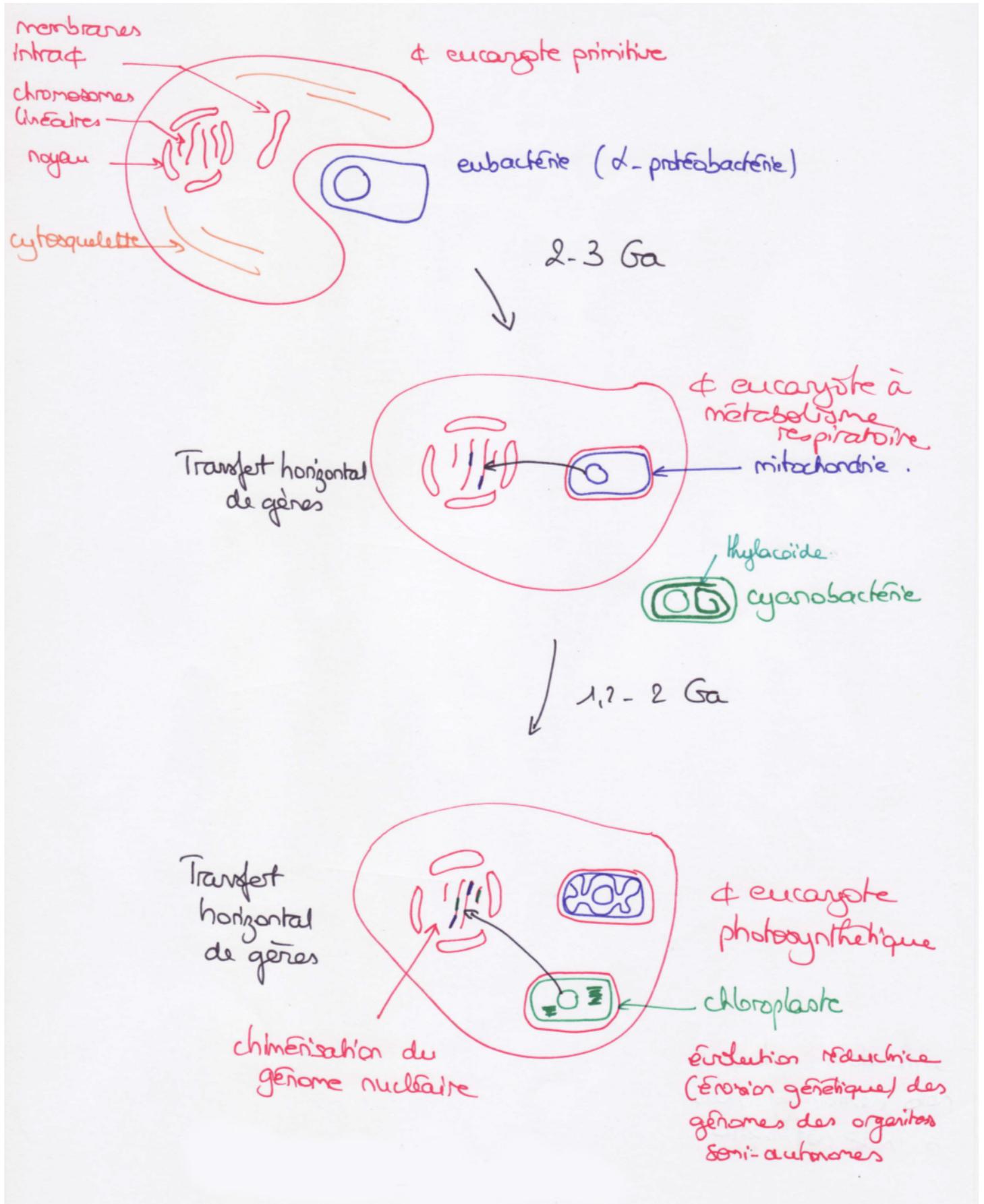
La membrane interne de la mitochondrie est donc un vestige de la membrane bactérienne ; la membrane externe de la mitochondrie est un vestige de la membrane de la vésicule d'endocytose.

## ENDOSYMBIOSE A L'ORIGINE DES CHLOROPLASTES



Endosymbiose des chloroplastes d'après Boitard, modifié et simplifié

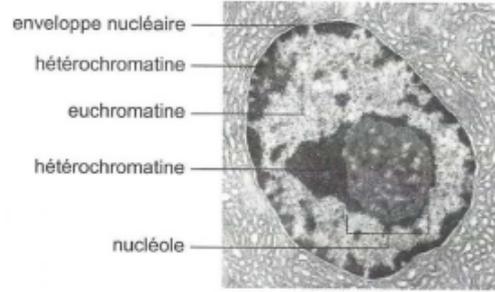
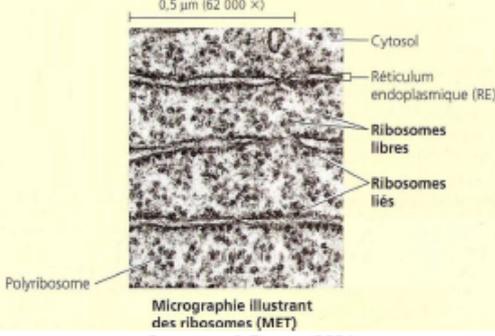
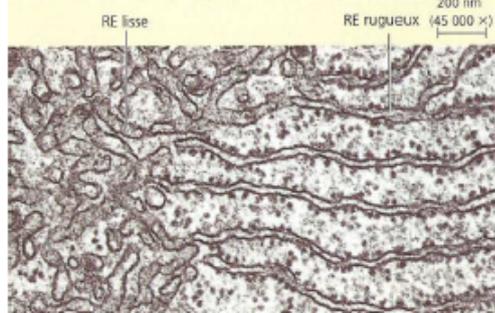
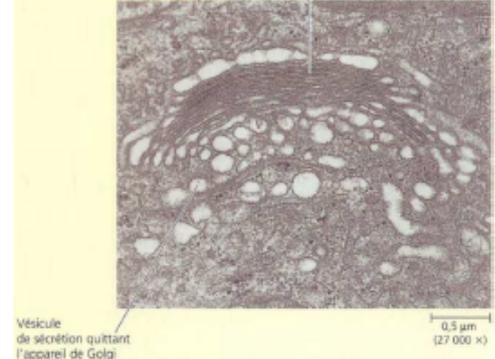
Schéma : l'origine des cellules eucaryotes par endosymbiose

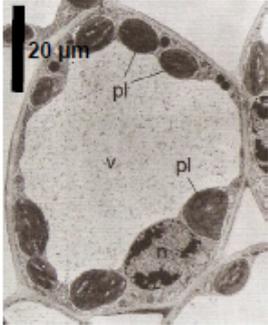
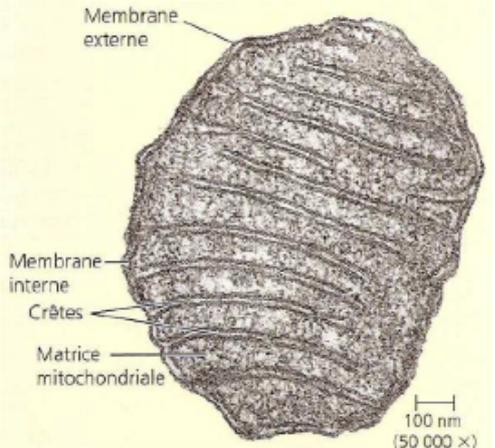
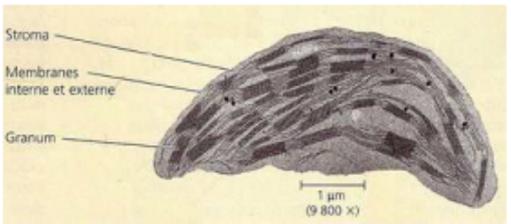


**FIGURE 2 – PRINCIPAUX ORGANITES ET COMPARTIMENTS DES CELLULES EUCARYOTES**

(d'après un document de Tanguy Jean)

**Ordres de grandeur à connaître :**Noyau : 5-10  $\mu\text{m}$ Mitochondrie : 1  $\mu\text{m}$ Chloroplaste : 5  $\mu\text{m}$ **Il faut également savoir schématiser les principaux organites !**

Structure cellulaire		Organisation	Fonction	Électronographie (MET)
NOYAU	Enveloppe nucléaire	- Double membrane percée de pores (pas toujours visibles au MET)	- Limitation du noyau (enfermement de l'IG) - Échanges avec le cytosol : ARN, ribosomes, protéines	 <p>enveloppe nucléaire hétérochromatine euchromatine hétérochromatine nucléole</p> <p>PEYCRU <i>et al.</i> (2013)</p>
	Chromatine	- ADN plus ou moins condensé dans le nucléoplasme > euchromatine (très décondensée) + hétérochromatine (relativement condensée)	- Stockage de l'IG - Duplication de l'IG (par réplication de l'ADN) - Expression génétique : transcription (= production des ARN)	
	Nucléole(s)	- Zone très riche en protéines (très sombre au MET) et plutôt ovoïde	- Synthèse des ARNr et assemblage des sous-unités ribosomiques	
CYTOPLASME	Cytosol	- Liquide fondamental de la cellule riches en solutés variés - Contient des ribosomes	- Fonctions variées - Ribosomes : traduction (= production de protéines)	 <p>0,5 <math>\mu\text{m}</math> (62 000 x)</p> <p>Cytosol Réticulum endoplasmique (RE) Ribosomes libres Ribosomes liés Polyribosome</p> <p>Micrographie illustrant des ribosomes (MET)</p> <p>CAMPBELL &amp; REECE (2004)</p>
	Réticulum endoplasmique granuleux (REG)	- Saccules de section constante (saccule en coupe : 2 membranes rapprochées) et espaces régulièrement, portant de nombreux ribosomes liés	- [Fabrication et] maturation des protéines membranaires et des protéines destinées à la sécrétion	 <p>200 nm RE lisse RE rugueux (45 000 x)</p> <p>CAMPBELL &amp; REECE (2004)</p>
	Réticulum endoplasmique lisse (REL)	- Réseau de tubules (tubule en coupe : forme ovoïde ou tubulaire) et dépourvues de ribosomes liés	- Synthèse de lipides variés : phospholipides, cholestérol, stéroïdes... - Stockage de calcium (calciosome)	
	Appareil de GOLGI (dictyosomes)	- Saccules fins et très rapprochés + vésicules (vésicule : petit compartiment cellulaire sphérique)	- Isolement, tri et modification des protéines membranaires et destinées à la sécrétion	 <p>Appareil de Golgi</p> <p>Vésicule de sécrétion quittant l'appareil de Golgi</p> <p>0,5 <math>\mu\text{m}</math> (27 000 x)</p> <p>CAMPBELL &amp; REECE (2004)</p>

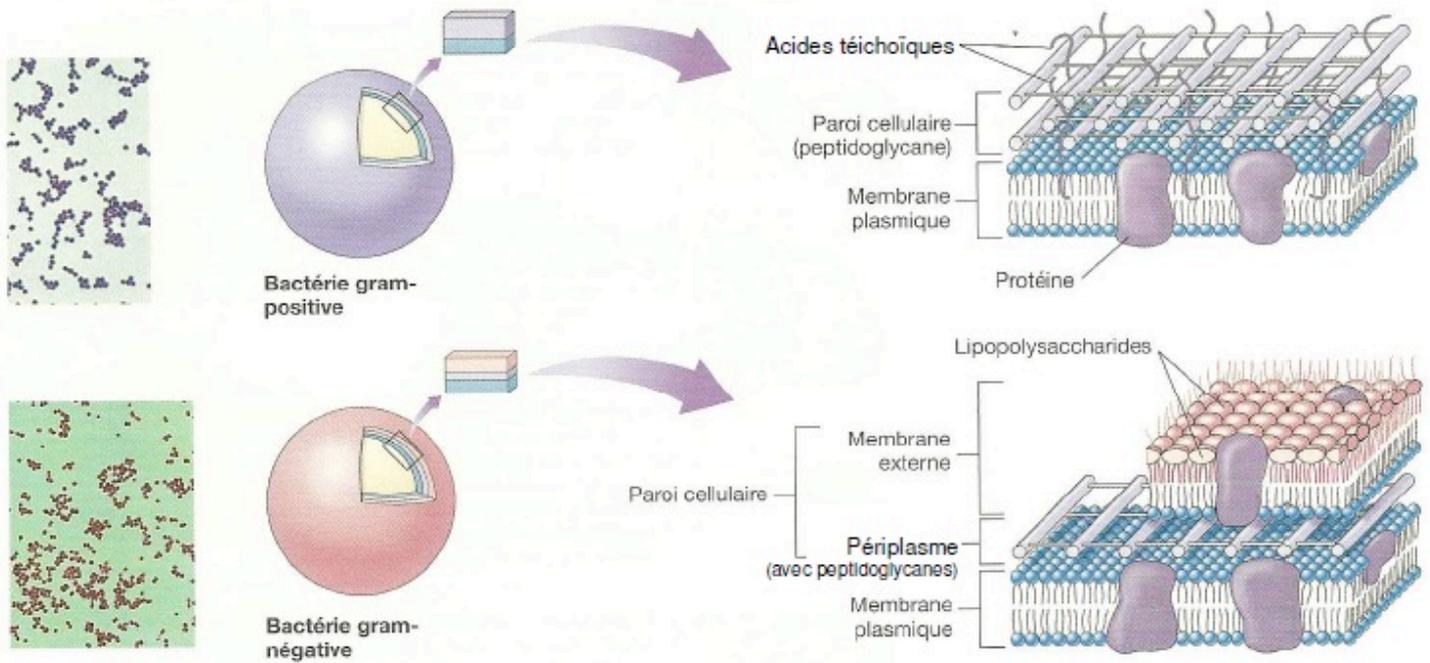
<b>Lysosomes</b> <i>[c. animales]</i>	- Compartiments ovoïdes difficiles à caractériser sur le plan ultrastructural - pH acide, riches en enzymes hydrolytiques	- Digestion des déchets cellulaires, des organites endommagés et du contenu des endosomes	
<b>Vacuole</b> <i>[c. végétales]</i>	- Compartiment très grand et souvent unique ( <i>sauf cellules méristématiques : multiples petites vésicules</i> )	- Gestion des déchets cellulaires - Turgescence - Homéostasie cellulaire et tampon ionique - Stockage de pigments hydrophiles - Stockage de métabolites variés : saccharose, acide malique	 ROBERT & ROLAND (1998a)
<b>Péroxyosomes</b>	- Allure de vésicules	- Gestion des ROS ( <i>reactive oxygen species</i> ) - Voies métaboliques variées, exemple : <b>photorespiration chez les plantes</b>	
<b>Mitochondries</b> <i>[organite semi-autonome : origine endosymbiotique]</i>	- Double membrane (enveloppe) - Membrane interne avec des crêtes riches en sphères pédonculées - Présence d'ADN (rarement visible au MET) et de ribosomes dans la matrice	- Respiration cellulaire : production d'ATP par oxydation de matière organique	 CAMPBELL & REECE (2004)
<b>Chloroplastes</b> <i>[c. végétales chlorophylliennes]</i> <i>[organite semi-autonome : origine endosymbiotique]</i>	- Double membrane (enveloppe) - Présence de saccules nommés thylakoïdes, localement empilés en grana - Présence d'ADN (rarement visible au MET) et de ribosomes dans le stroma - Inclusions, notamment amidon et gouttelettes lipidiques	- Photosynthèse : production de matière organique à partir de matière minérale et de lumière	
<b>Existence d'autres plastes dans d'autres cellules végétales : proplast, amyloplast, chromoplast...</b>			

### Diversité des plastes chez les cellules végétales :

- **Chloroplastes** : plastes riches en pigments photosynthétiques (chlorophylles et caroténoïdes) dans la membrane des thylacoïdes. Fonction de **photosynthèse**.
- **Amyloplast** : plastes accumulant de l'amidon ; organites fréquemment rencontrés dans des organes de réserve (tubercules), dans les cotylédons des graines, .... Fonction de **réserve**.
- **Chromoplast** : plastes accumulant des pigments rouge-orangés (famille des caroténoïdes). Fonction d'attraction des animaux pour la dispersion des fruits (zoochorie) ou du pollen.
- **Oléoplast** : plastes accumulant des lipides de type triglycérides
- ...

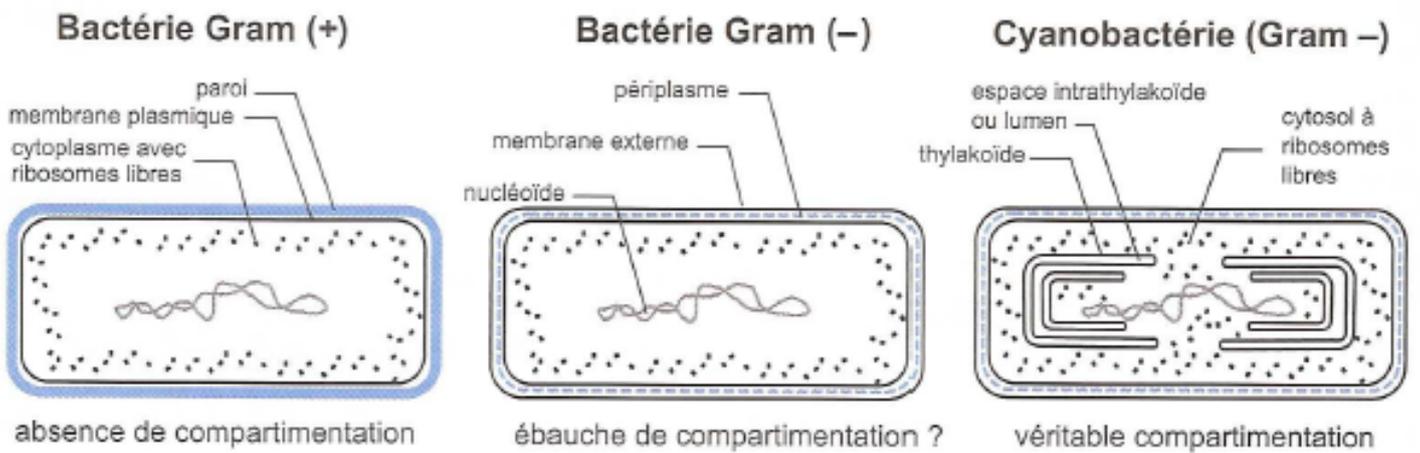
Tous les plastes dérivent de **proplast**, plastes indifférenciés.

**FIGURE 3 – LES PAROIS BACTERIENNES**



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

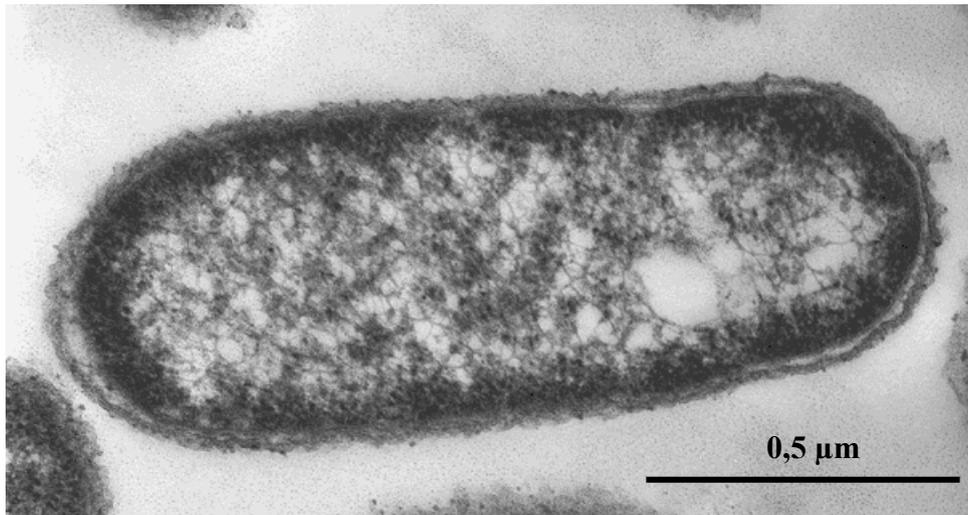
**FIGURE 4 – DIVERSITE DES EUBACTERIES** (Peycru et al 2010)



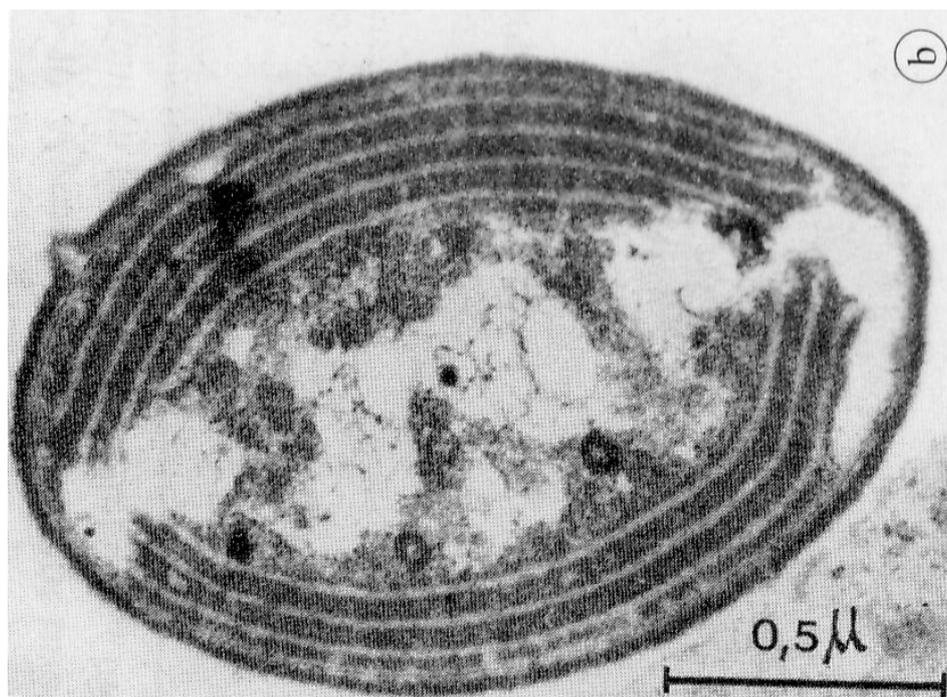
Espaces et compartiments chez les bactéries.

**FIGURE 5 – CLICHE DE MET DE DIVERSES BACTERIES**

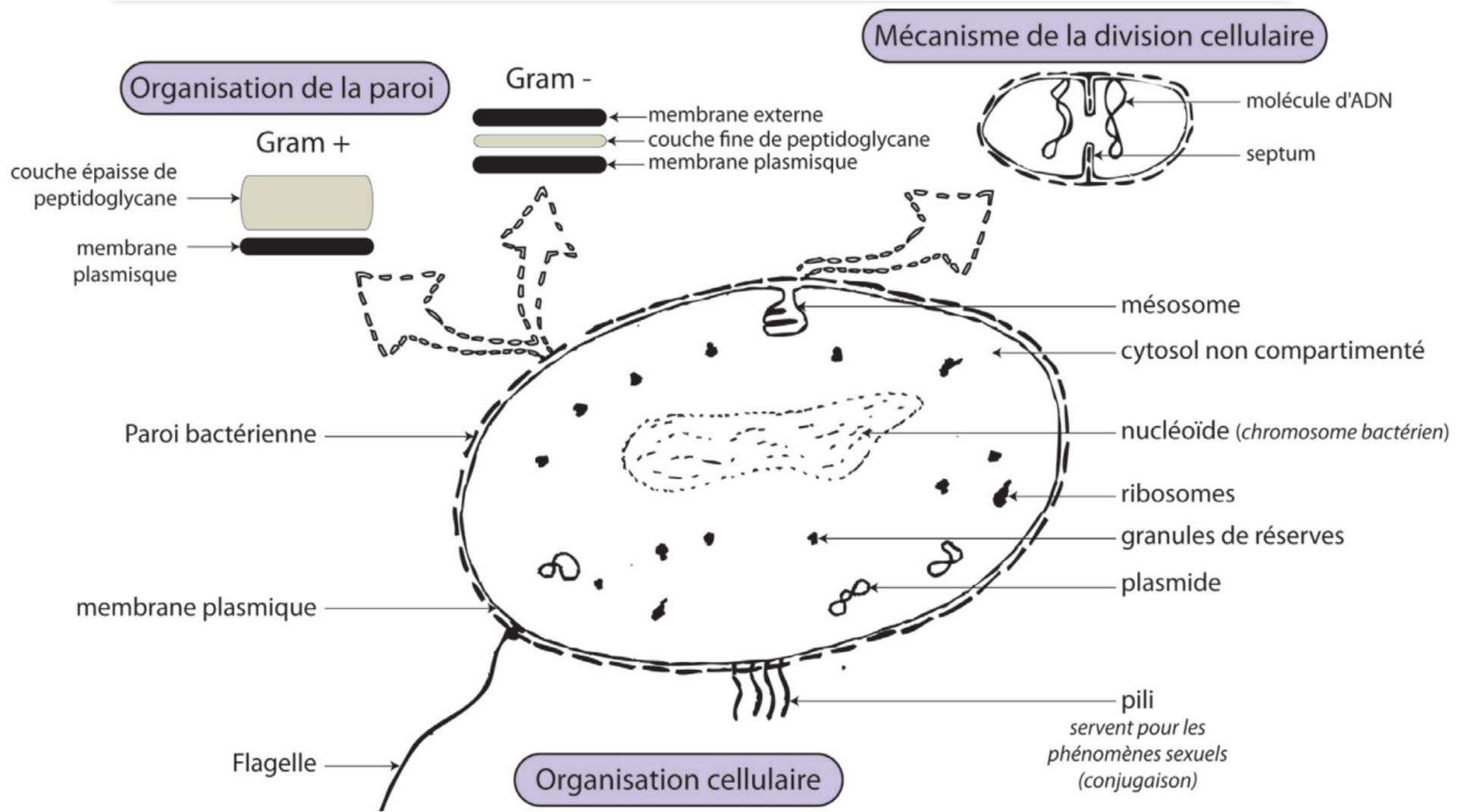
***Escherichia coli***



***Cyanobactérie***



**FIGURE 6 – SCHEMATISATION DE L'ORGANISATION STRUCTURALE ET FONCTIONNELLE D'UNE BACTERIE**



## DES CELLULES TRAVERSEES PAR DES FLUX

### FIGURE 7 - SUIVI DU TRAJET INTRACELLULAIRE DES PROTEINES SECRETEES PAR PULSE-CHASE

**Expérience de Palade et al. (années 1960)** réalisée sur les cellules exocrines pancréatiques, qui sécrètent les enzymes digestives dans l'intestin via le canal cholédoque.

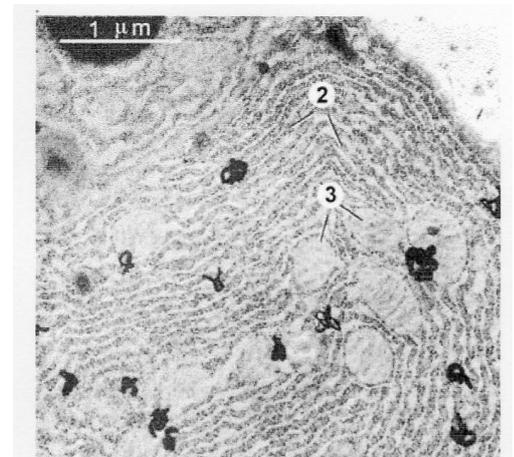
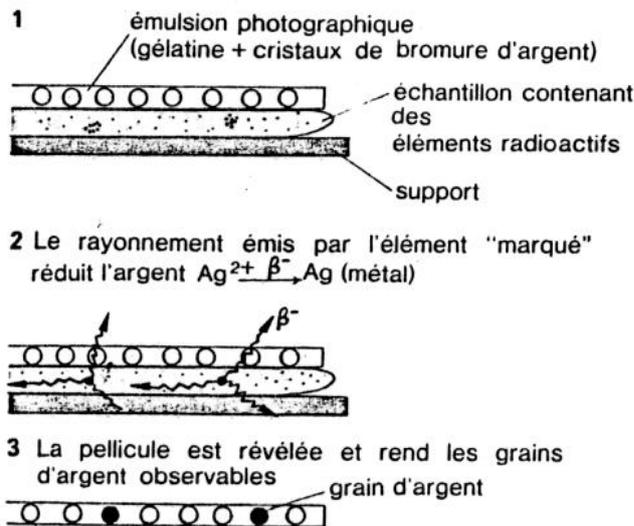
L'expérience consiste à incuber des coupes de pancréas dans un milieu contenant de la leucine (acide aminé) radioactive (leucine tritiée) pendant un temps très court (3 min) = **PULSE**. **La leucine radioactive est intégrée dans les protéines en cours de traduction.**

Puis les coupes sont transférées dans un milieu contenant de la **leucine non radioactive** pendant un temps variable = **CHASE** ou **CHASSE**. Les coupes sont ensuite autoradiographiées.

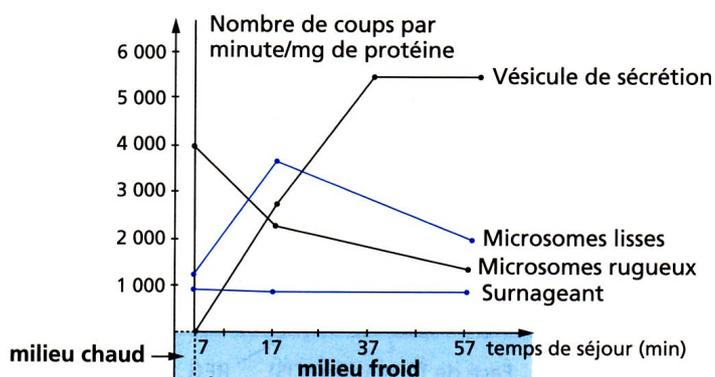
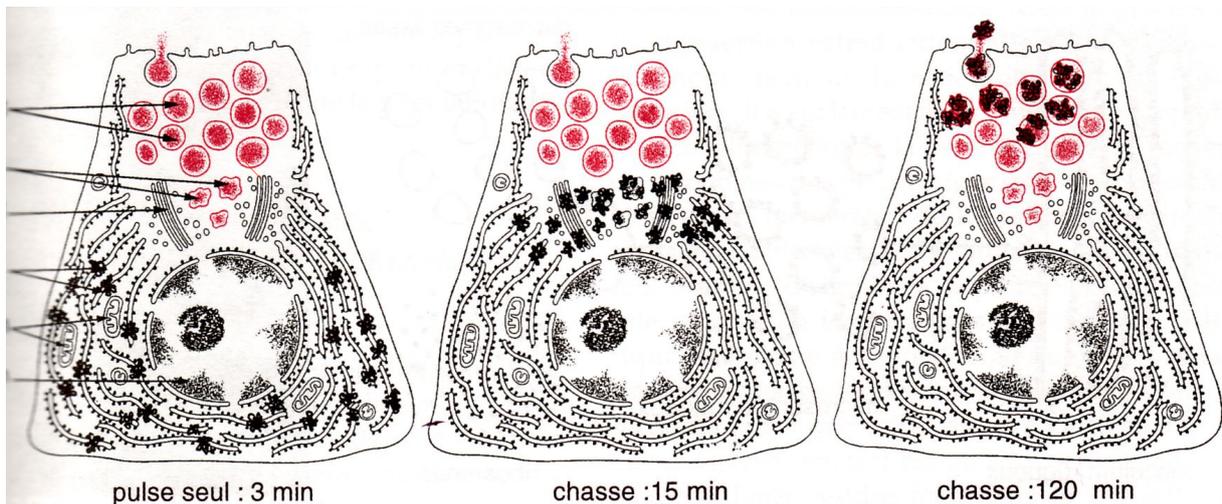
#### Principe de l'autoradiographie :

Le rayonnement radioactif réduit les ions  $Ag^{2+}$  en grains d'argent métallique, observables au microscope sous forme de grains noirs.

**Résultat d'une autoradiographie** de cellule pancréatique prélevée au bout de 3 minutes de séjour dans un milieu contenant de la leucine marquée



#### Schématisation des autoradiographies après différents temps de chasse

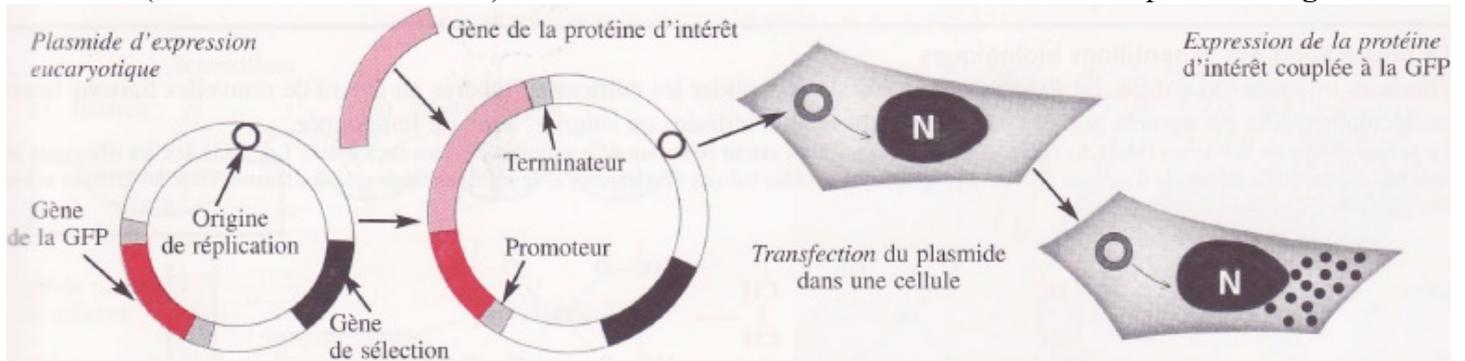


Pour préciser la localisation cellulaire des protéines néosynthétisées (l'autoradiographie manquant de précision), les chercheurs ont réalisé un fractionnement cellulaire par centrifugation différentielle en parallèle de l'expérience précédente.

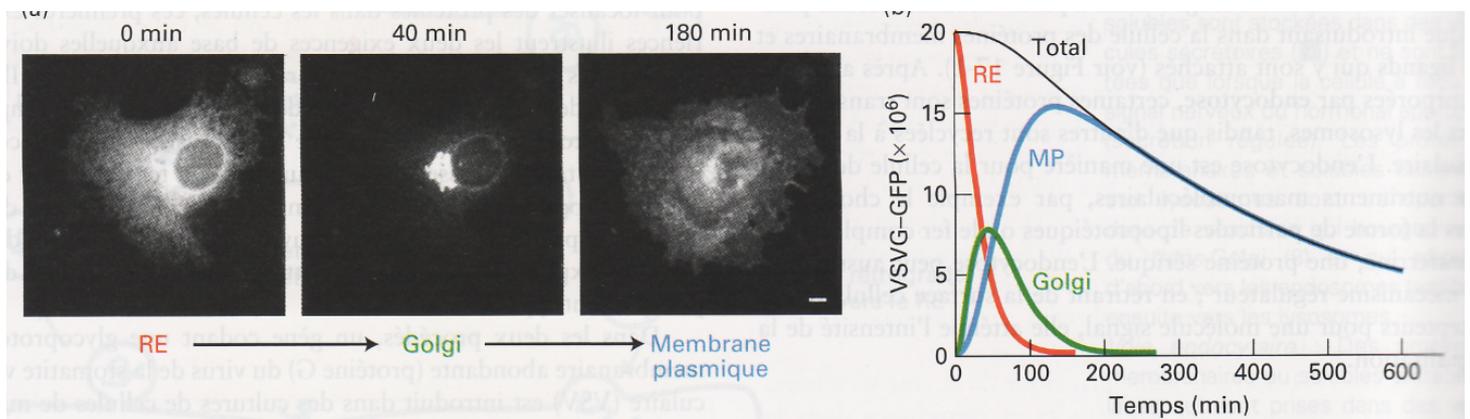
La radioactivité est mesurée dans les différentes fractions isolées de cellules pancréatiques (graphique ci-contre).

**FIGURE 8 – UTILISATION DE LA GFP POUR LA LOCALISATION DE PROTEINES : EX. DE LA VOIE SECRETOIRE.**

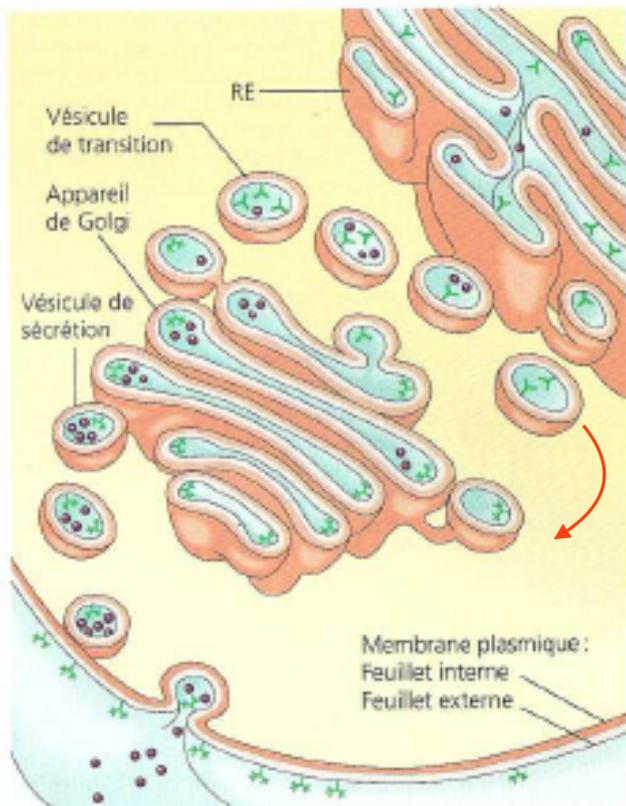
Une construction génétique contenant le gène d'une protéine (ici protéine membranaire) fusionné avec le gène de la GFP (Green Fluorescent Protein) est introduit dans des cellules en culture = technique de **transgène**.



La fluorescence émise par la protéine fusion (= protéine mb-GFP) est suivie au cours du temps par **microscopie à fluorescence** : on observe ainsi le transport de cette protéine au long de la voie sécrétoire.



*NB : un dispositif particulier permet de suivre quelques protéines uniquement, afin d'identifier les étapes.*

**FIGURE 9 – TRAFIC VESICULAIRE ENTRE LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS DE LA VOIE SECRETOIRE DES PROTEINES (Campbell)**

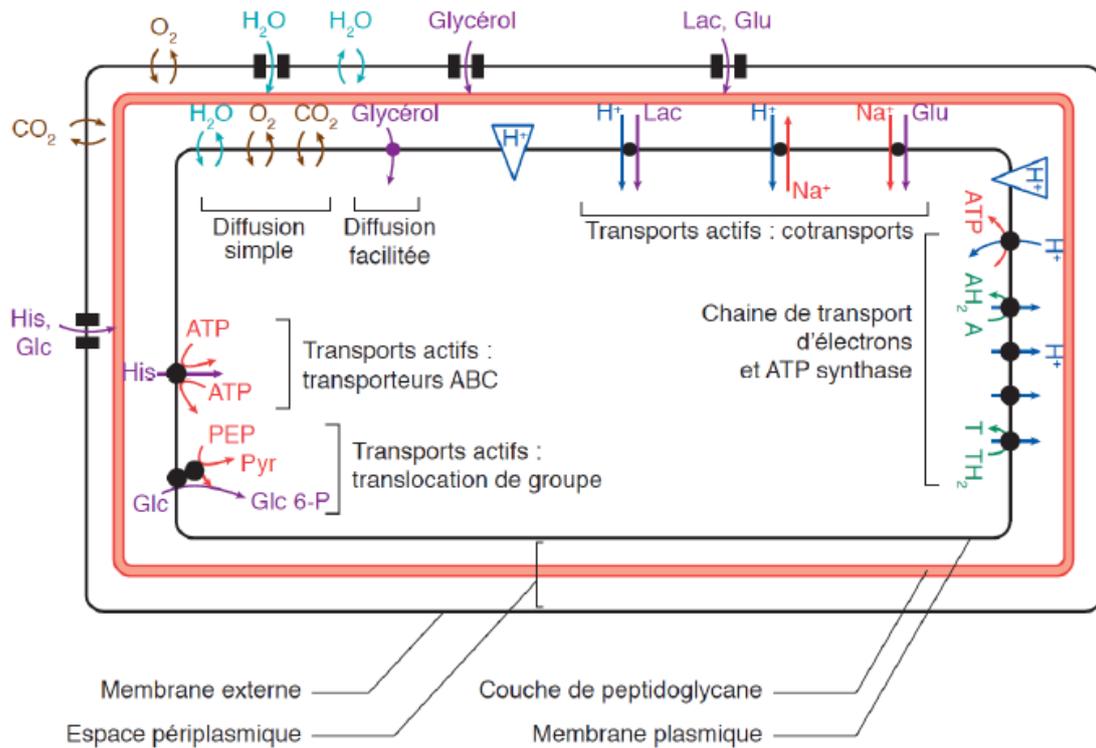
Des **vésicules** (dites de **transition**) se forment par bourgeonnement à la surface du REG et transitent jusqu'à la face cis d'un dictyosome de l'appareil de Golgi : les protéines passent ainsi **du REG à l'appareil de Golgi** où elles subissent des **maturations** (glycosylations, phosphorylations, clivages, ...).

Les protéines passent ensuite d'un saccule golgien à un autre par des vésicules.

Enfin, sur la face trans du dictyosome, des **vésicules de sécrétion** bourgeonnent et transitent jusqu'à la membrane plasmique où elles sont **exocytées** : les protéines sont alors sécrétées.

*Les protéines membranaires sont représentées par des petits arbuscules, les protéines libres sont représentées par des boules.*

**FIGURE 10 – TRANSFERTS DE MATIERE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE PLASMIQUE DE LA BACTERIE *E. COLI***  
(Segarra et al. 2015)



Les modalités de traversée de la membrane plasmique sont très diverses et illustrées sur la figure. Seuls quelques exemples ont été donnés par catégorie de biomolécules.

Abréviations des glucides :

Gal : galactose ; Glc : glucose ; Glc-6P : glucose 6 phosphate ; Lac : lactose

Abréviations des acides aminés :

Glu : glutamate ; His : histidine

Abréviations d'autres constituants :

T/TH<sub>2</sub> : transporteur d'électrons oxydé/réduit ; A/AH<sub>2</sub> : accepteur d'électrons oxydé/réduit

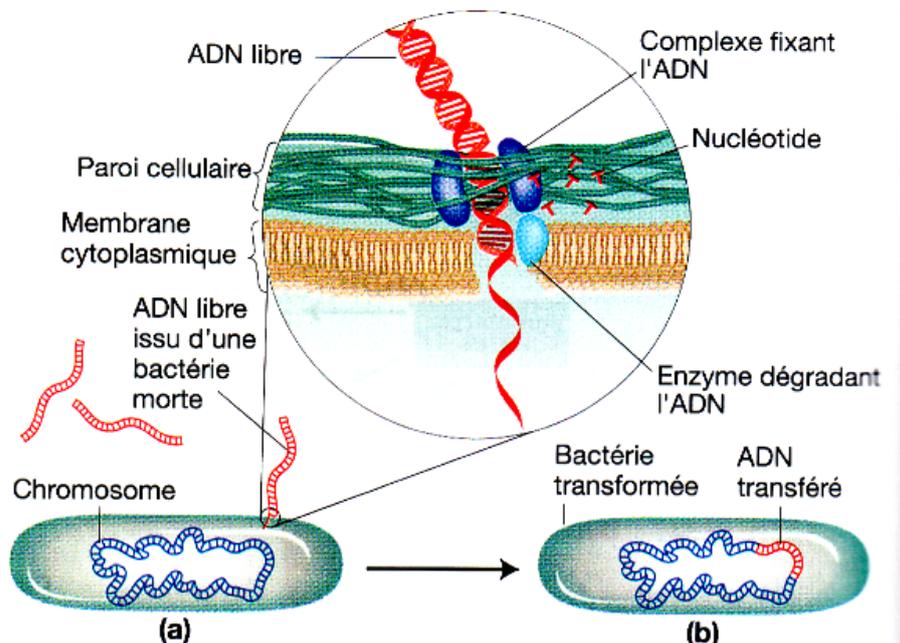
ATP : adénosine tri-phosphate ; PEP : phospho-énol-pyruvate ; Pyr : pyruvate

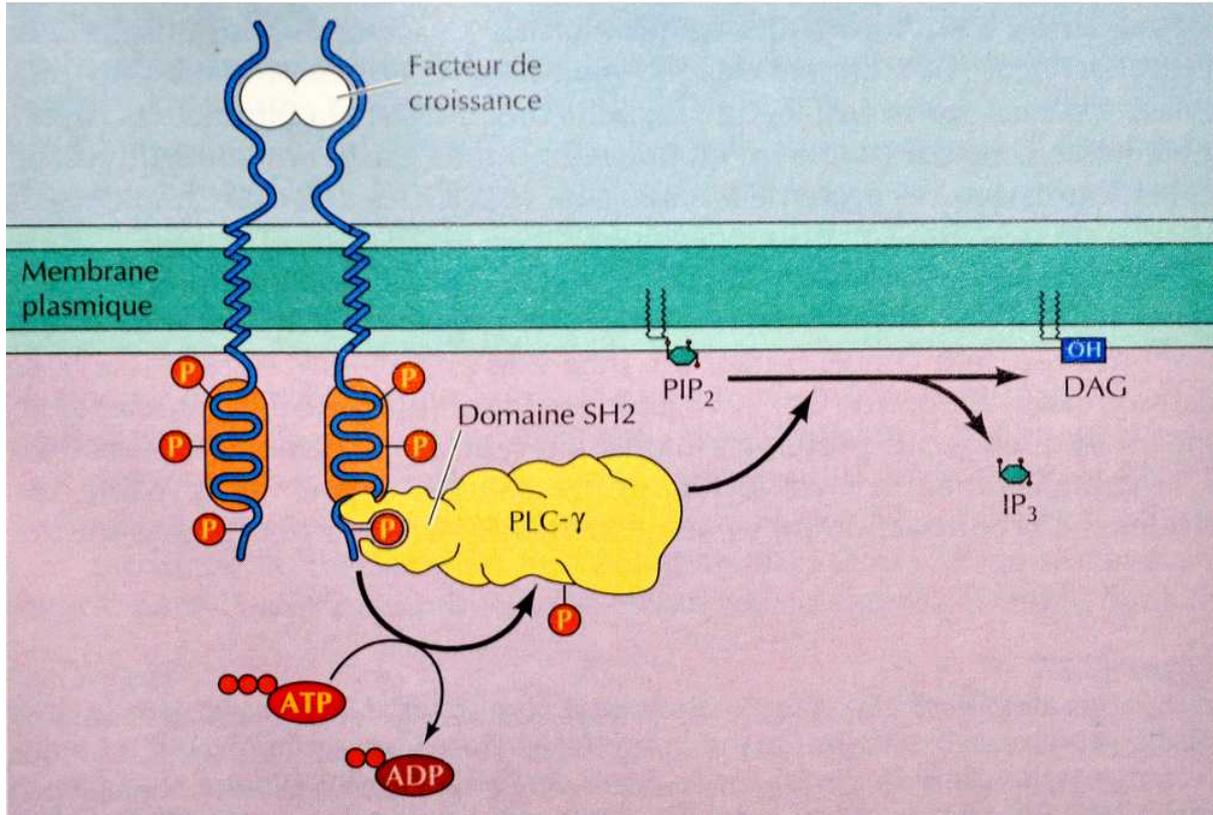
**NB** La traversée de la membrane externe sollicite surtout les porines, peu sélectives.

**FIGURE 11 – LA TRANSFORMATION BACTERIENNE : FLUX D'INFORMATION GENETIQUE EXTRACELLULAIRE**

(Griffiths)

Une bactérie en cours de transformation (a) absorbe de l'ADN libéré par une bactérie morte. Au fur et à mesure de l'entrée de l'ADN au niveau de complexes de fixation à la surface de la bactérie, des enzymes dégradent l'un des brins en nucléotides ; un dérivé de l'autre brin peut être intégré dans le chromosome bactérien.



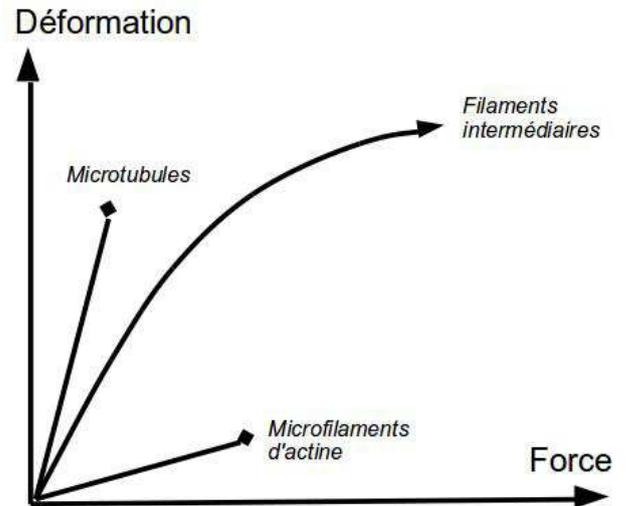
**FIGURE 12 – MECANISME DE TRANSDUCTION CELLULAIRE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE PLASMIQUE**

Un **facteur de croissance** (ex : FGF, TGF $\beta$ ) interagit avec son **récepteur**, une protéine membranaire. Cela provoque la phosphorylation par l'ATP et activation d'une enzyme, la phospholipase C (PLC- $\gamma$ ), qui hydrolyse alors un phospholipide membranaire, le PIP<sub>2</sub> en seconds messagers (IP<sub>3</sub> et DAG). Ces seconds messagers diffusent dans la cellule et dans la membrane et déclenchent une réponse cellulaire adaptée.

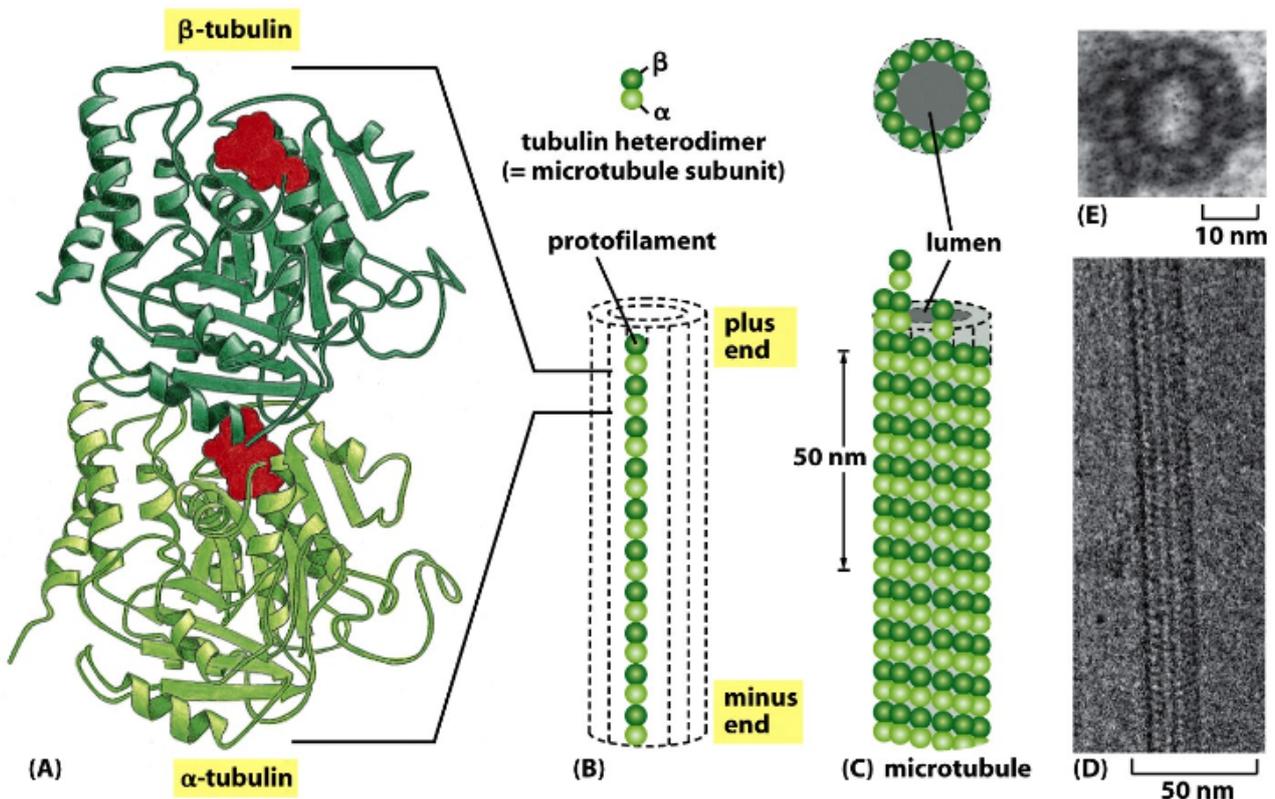
## ORGANISATION FONCTIONNELLE DU CYTOSQUELETTE EUCARYOTE

**FIGURE 13 - MESURE RELATIVE DE LA DEFORMATION DES 3 ELEMENTS DU CYTOSQUELETTE EN FONCTION DE LA FORCE DE TRACTION EXERCEE.**

Le carré indique le point de rupture. La pointe de flèche l'absence de rupture à ce stade.



**FIGURE 14 - STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN MICROTUBULE**

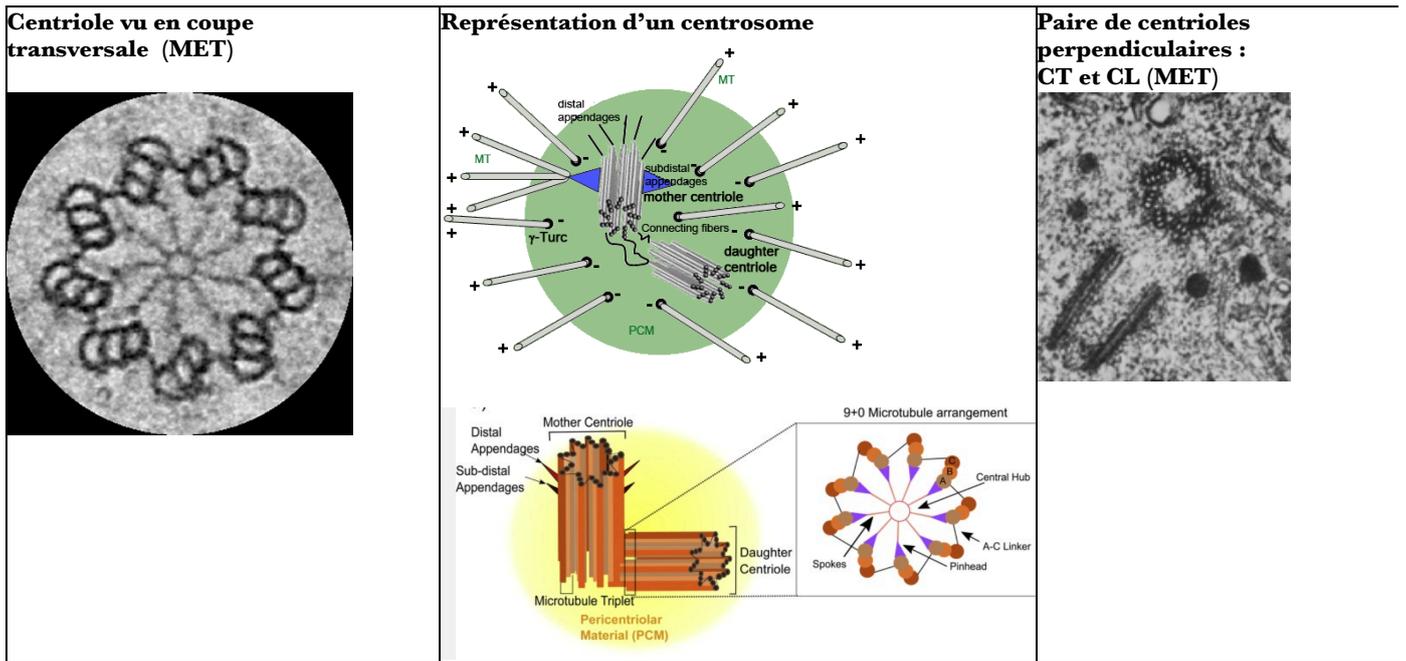


Le microtubule est constitué d'unités globulaires de tubuline de 5nm environ de diamètre, associées en dimère  $\alpha$ - $\beta$ .

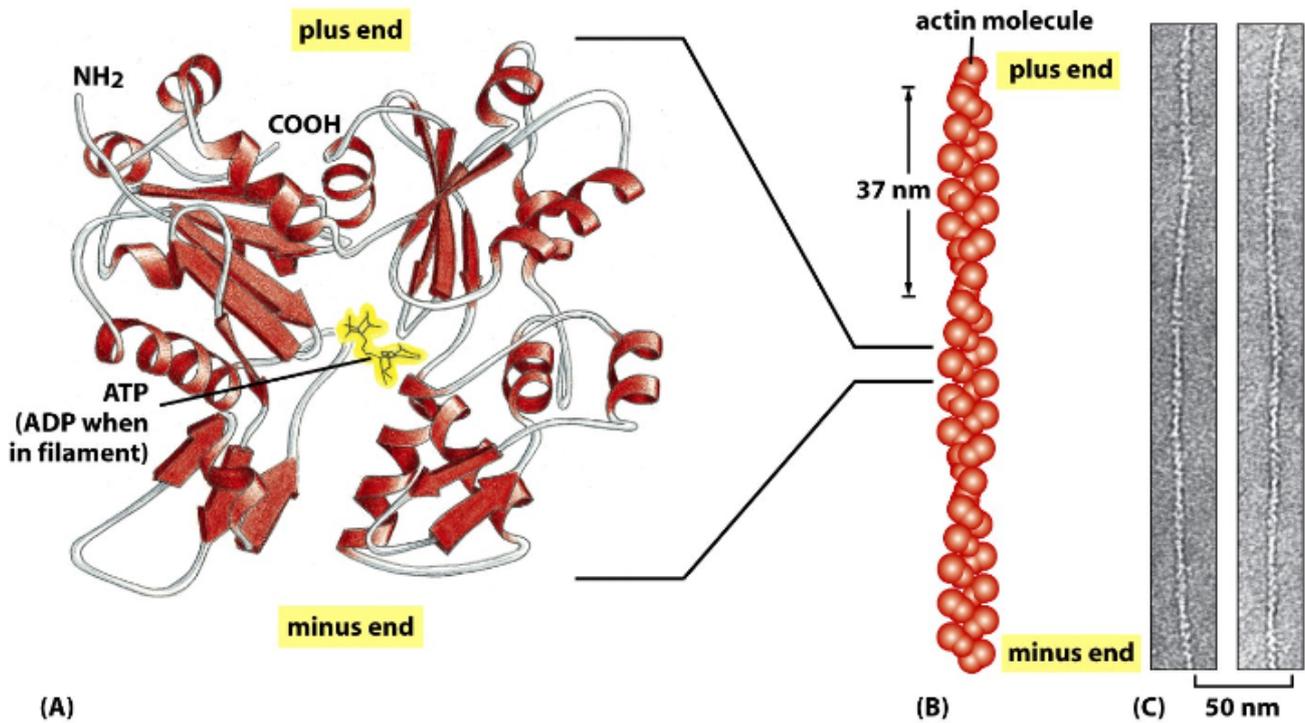
Les microtubules sont des **tubes cylindriques, creux et rigides**. Ils sont constitués de dimères de **tubuline  $\alpha$  et  $\beta$**  associés par **liaisons faibles**; la tubuline étant une protéine **globulaire**. Une rangée longitudinale de tubulines constitue un protofilament. 13 protofilaments forment un microtubule.

Ci-contre : microtubule stabilisé par une protéine (MAP2)

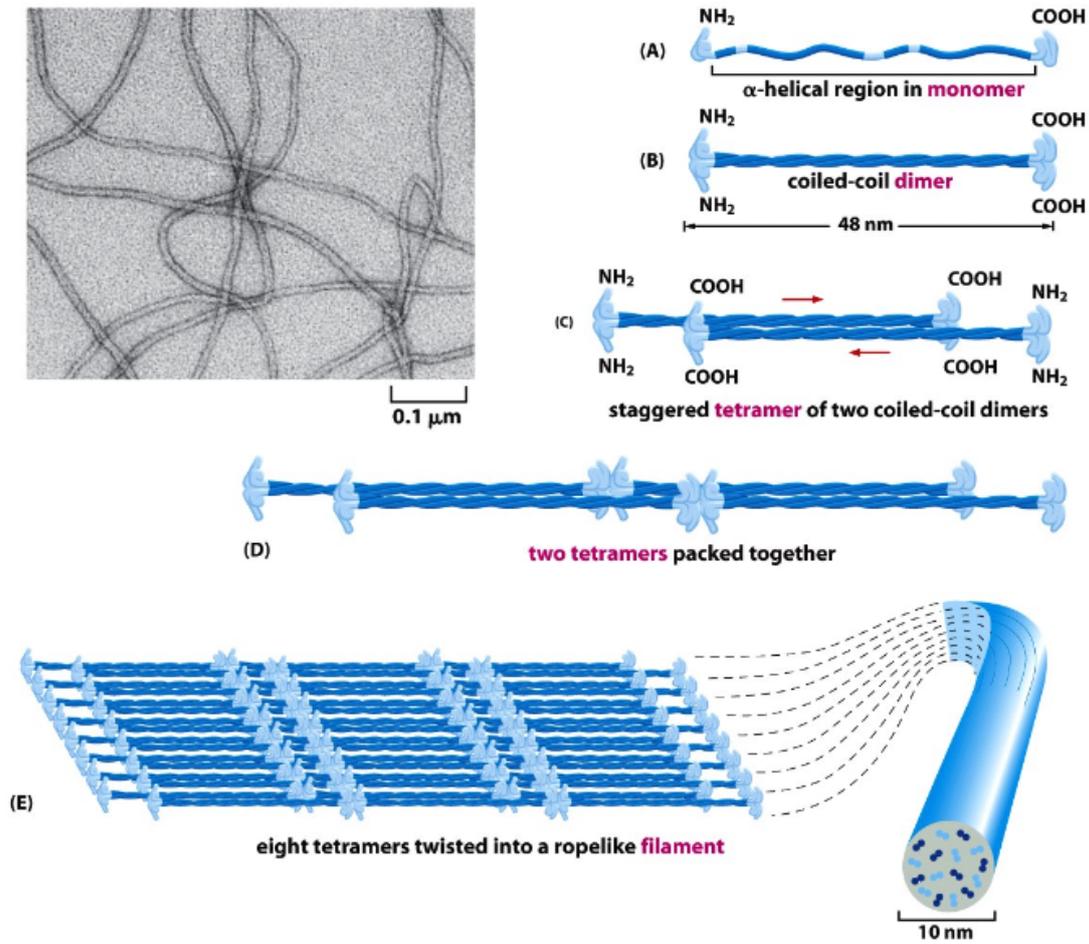
(*Alberts et al ; ressources unisciel*)



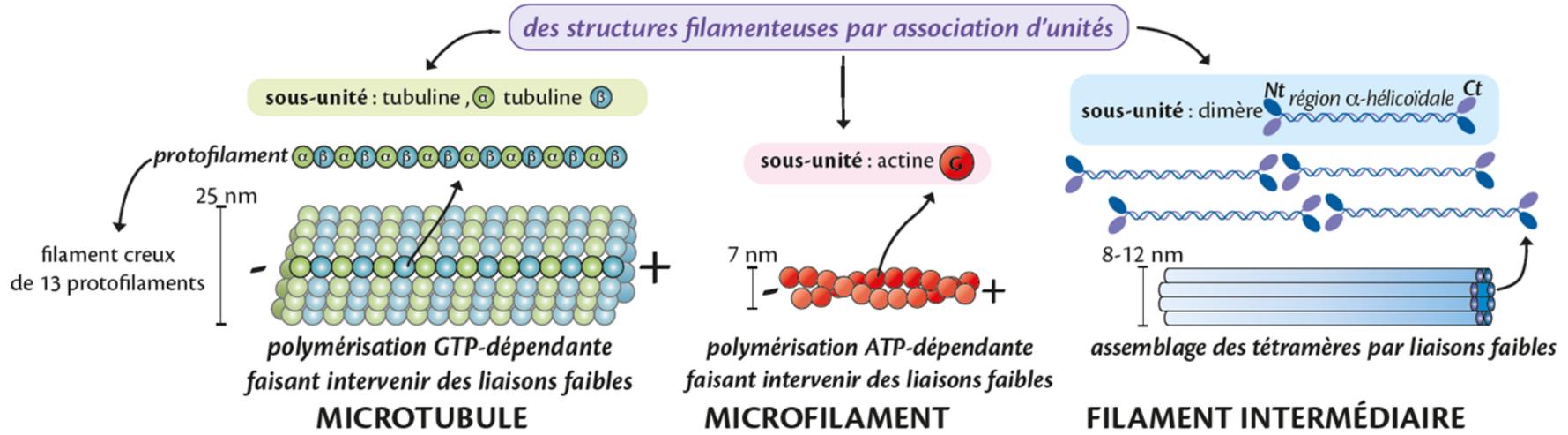
**FIGURE 15 - STRUCTURE MOLECULAIRE DES MICROFILAMENTS D'ACTINE.**



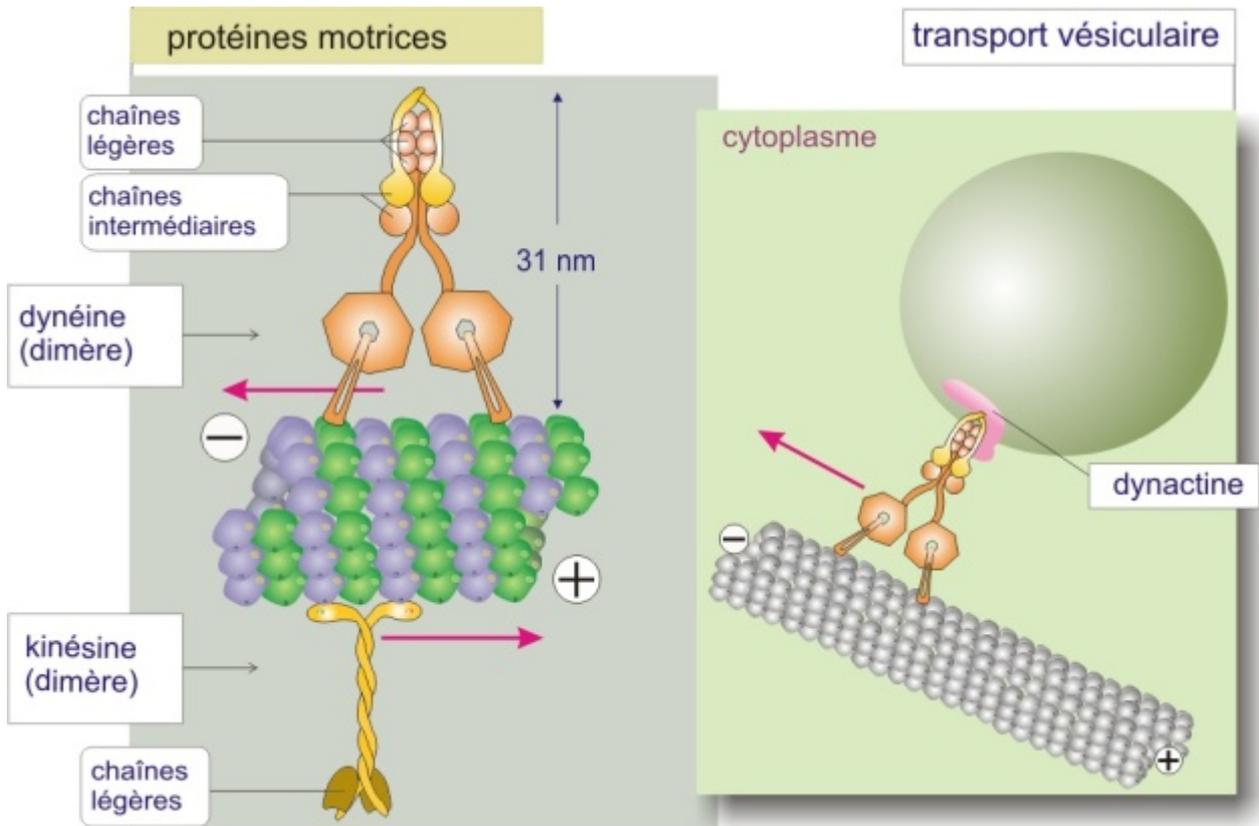
Les microfilaments d'actine (= actine F) sont des assemblages hélicoïdaux de protéine globulaire d'actine (actine G). Ils forment des structures flexibles, de 8nm de diamètre. (*Alberts et al*)

**FIGURE 16 - STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN FILAMENT INTERMEDIAIRE (KERATINE, LAMINES, ...)**

Les constituants de base sont des **protéines fibreuses**, associés en dimère par coiled-coil (2 hélices alpha superenroulées). Des tétramères associés ensemble forment un protofilament, et 8 protofilaments s'associent pour former les filaments.

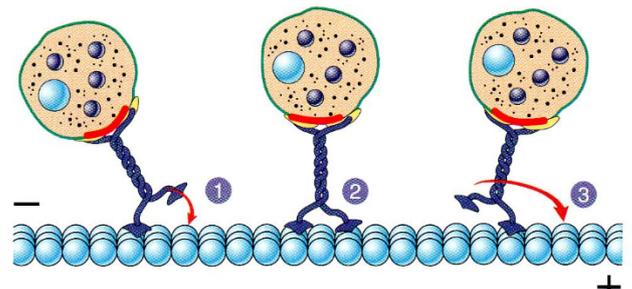
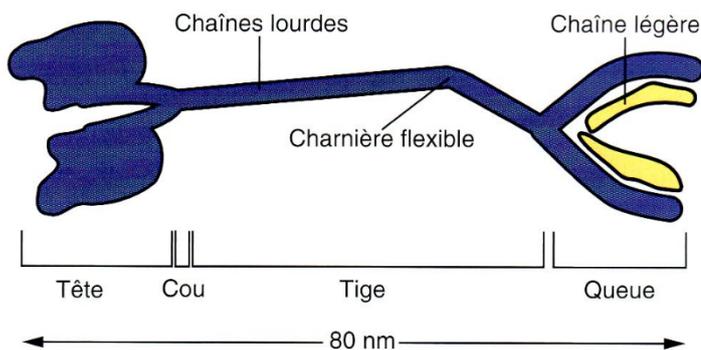
**Bilan sur le cytosquelette : A RETENIR**

<b>structure</b>	Tube creux constitué de 13 protofilaments	Deux chaînes d'actine F	8 protofilaments entrelacés
<b>monomères</b>	Tubuline $\alpha$ et $\beta$	Actine G	Différentes protéines (kératine)
<b>propriétés</b>	Polarité : Extrémités + et - Des structures dynamiques		Pas de polarité connue Des structures stabilisées par liaisons faibles

**FIGURE 17 – MOTEURS MOLECULAIRES INTERAGISSANT AVEC LES MICROTUBULES****Organisation fonctionnelle de la kinésine**

**Structure IV** : 2 chaînes lourdes et 2 chaînes légères. La tête forme le domaine moteur en interaction avec les microtubules, et la queue interagit avec l'organite à transporter (vésicule par exemple).

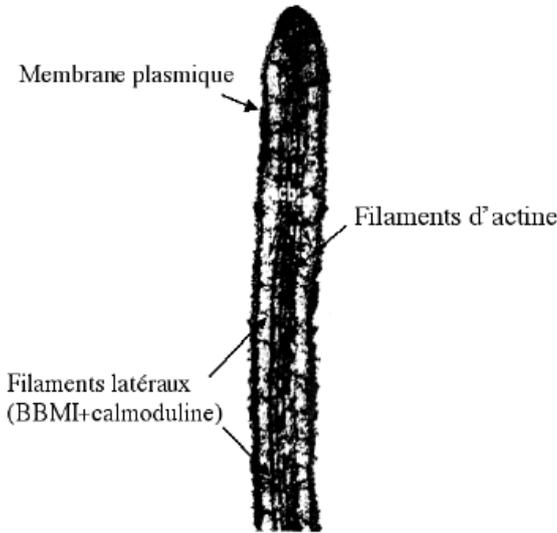
**Marche de la kinésine** : le domaine moteur de la kinésine (tête) se lie aux microtubules en absence d'ATP. La liaison à l'ATP engendre le mouvement de semi-rotation. (Le mouvement de semi-rotation est plutôt aléatoire mais étant donné le nombre limité de points de fixation (uniquement fixation kinésine/ $\beta$ -tubuline) et la taille des têtes, la résultante est un déplacement dirigé).



**FIGURE 18 – LES MICROFILAMENTS D’ACTINE FORMENT L’ARMATURE DES MICROVILLOSITES**

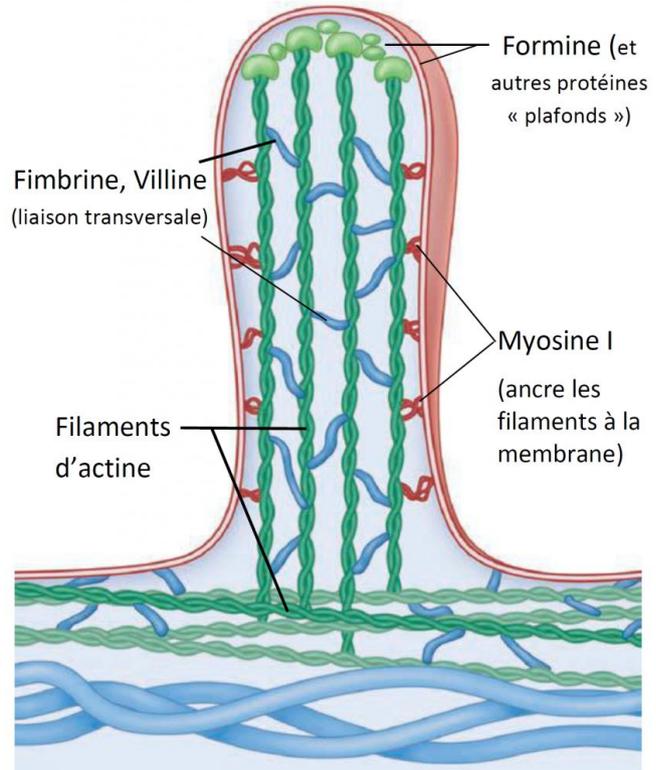
Les microvillosités des entérocytes possèdent une **armature** constituée de **microfilaments d'actine** associés en faisceaux **parallèles** et reliés les uns aux autres par une **protéine de pontage**, la **fimbrine**, et reliés à la membrane par des **myosines**. Ces filaments sont stabilisés par des **protéines de coiffage** qui se trouvent à leurs extrémités. Les filaments sont ancrés sur un réseau de **filaments périphériques sous-membranaires** (actine corticale).

**Observation en MET d’une microvillosité**



Longueur d’une microvillosité : 1 à 2 µm

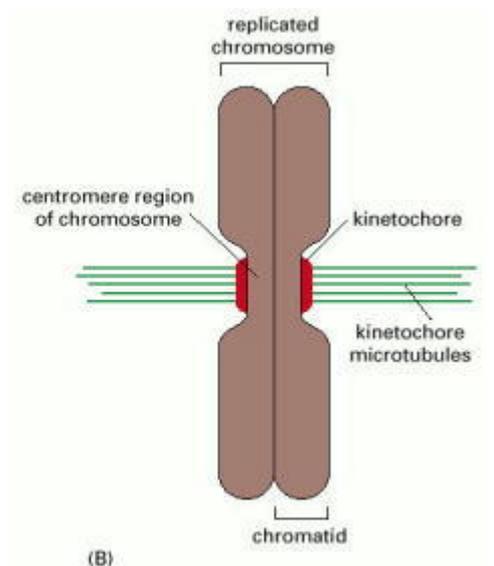
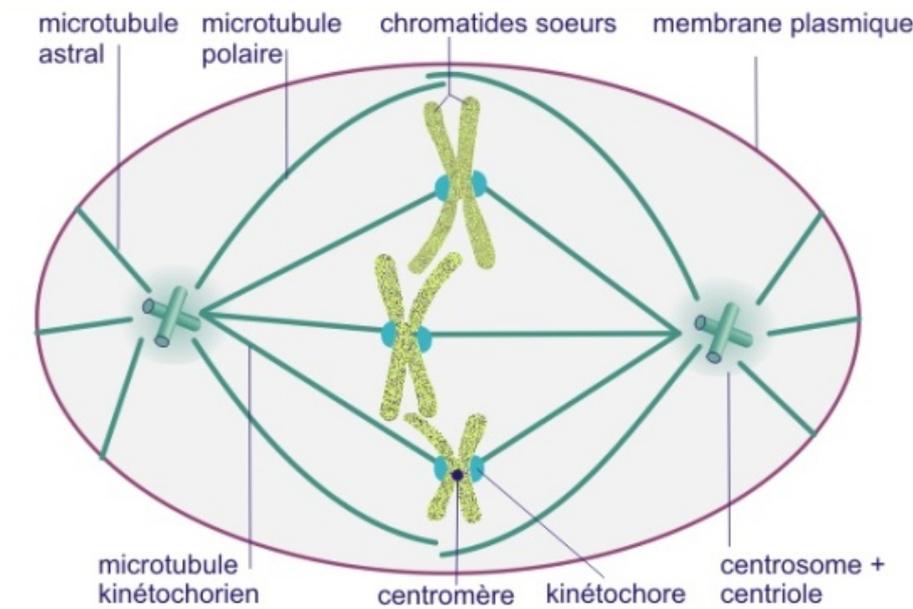
**Modèle moléculaire d’armature de microvillosité**



**FIGURE 19 – CYTOSQUELETTE ET MITOSE**

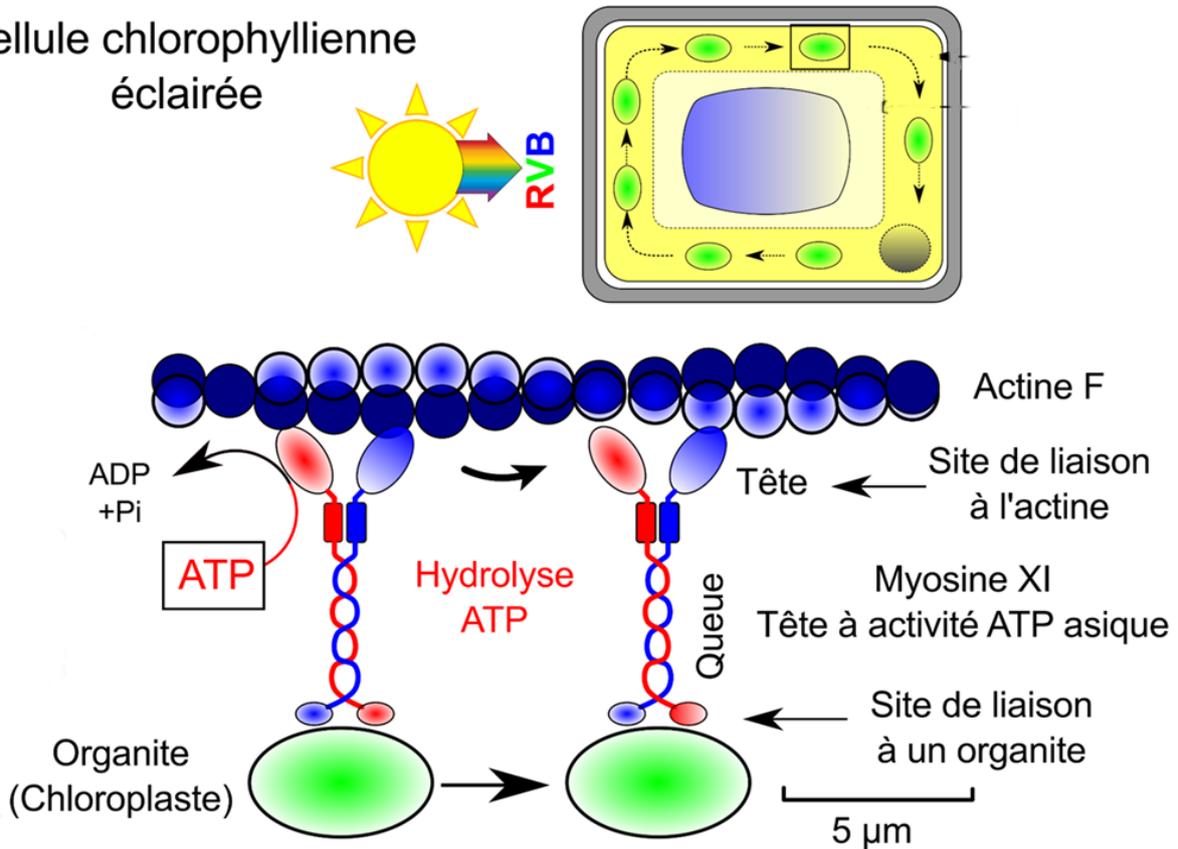
Le fuseau de division est composé de divers types de microtubules et de moteurs moléculaires (non représentés)

Ancrage des chromosomes sur les microtubules kinétochoriens



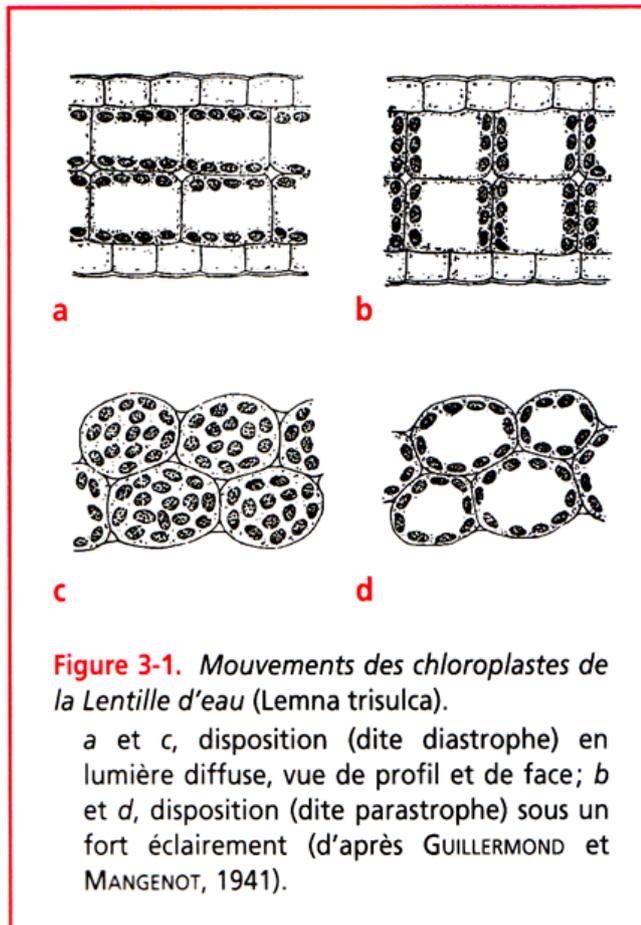
**FIGURE 20 – LA CYCLOSE DES CHLOROPLASTES**

Cellule chlorophyllienne  
éclairée

**Disposition des chloroplastes dans la cellule selon l'éclairement**

- en *éclairage faible* (quelques centaines ou milliers de lux, soit quelques  $W m^{-2}$  ou quelques dizaines de  $W m^{-2}$ ), les chloroplastes des Végétaux supérieurs, dont la position dans la cellule est quelconque à l'obscurité, viennent se disposer dans un plan perpendiculaire aux rayons lumineux (fig. 3-1), de face et les uns à côté des autres

- en *éclairage fort* (quelques dizaines de milliers de lux), ces chloroplastes s'alignent le long des parois, se masquant partiellement les uns les autres.



Heller