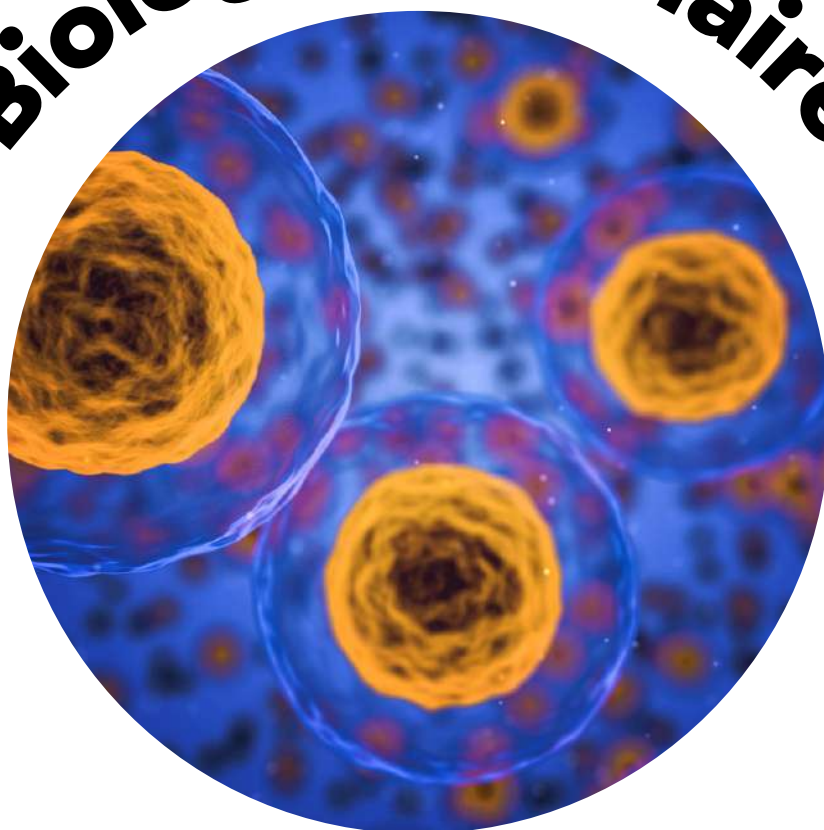


Biologie Cellulaire



SCIENCES DE LA
VIE ET DE LA TERRE



Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



Etudier



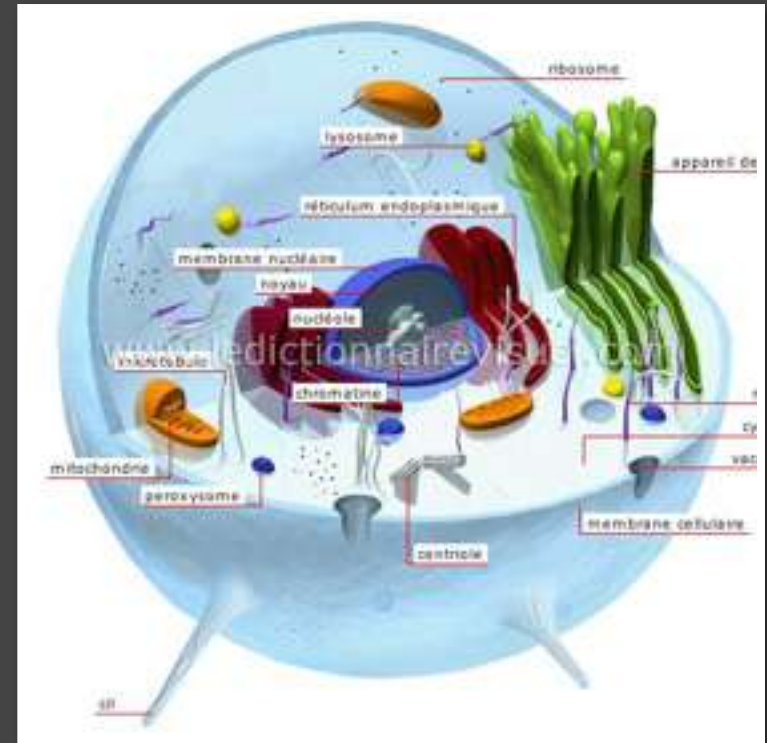
Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



Emploi



- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE



Biologie cellulaire

M^{me}Boutaina BELQAT

BIOLOGIE CELLULAIRE= connaissance de la cellule



Petite Histoire de la Biologie Cellulaire



1665 : Robert Hooke découvre des cellules dans du liège en utilisant les premiers microscopes.

1677 : Antoine van Leeuwenhoek, connu pour ses améliorations du microscope, observe le poivre ce qui l'amène à la découverte accidentelle d'**animalcules**, connus aujourd'hui sous le nom de **protozoaires**.



1838 : Matthias Jakob Schleiden (botaniste) et en 1839 : Theodor Schwann (zoologiste) découvrent que les plantes et les animaux sont tous faits de cellules, concluant que la cellule est l'unité commune de structure et de développement, ce qui fonda la **théorie cellulaire**.

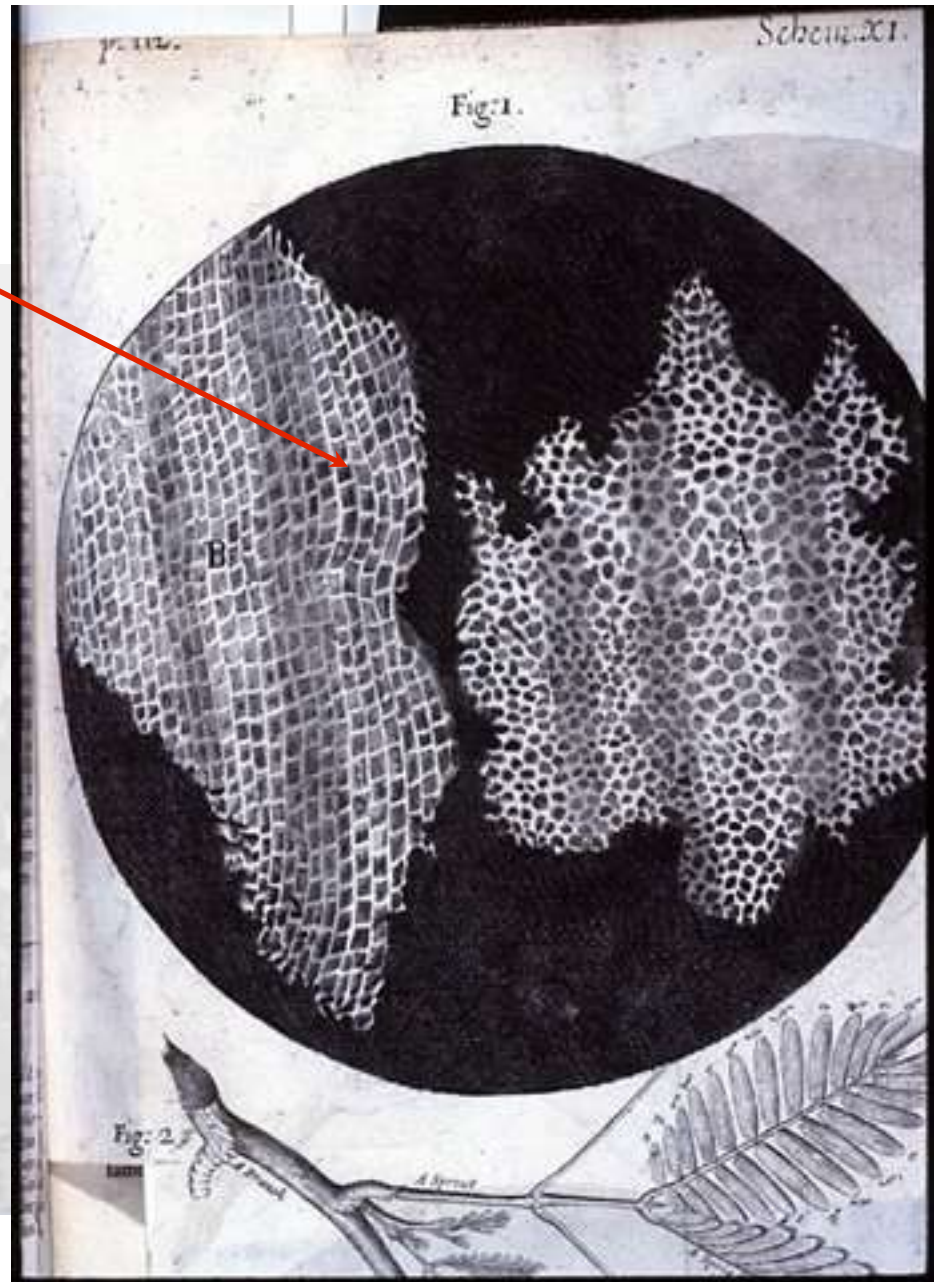
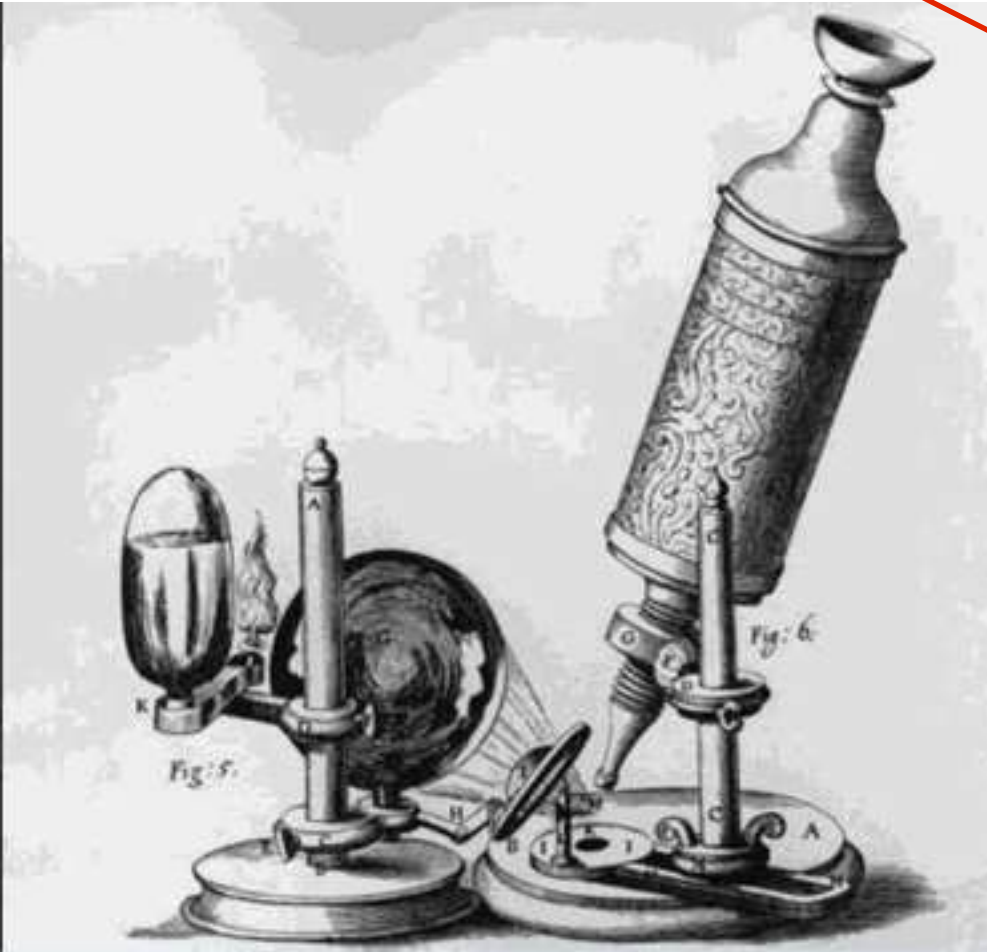
1858 : Louis Pasteur réfute la **génération spontanée**, croyance selon laquelle des formes de vie peuvent apparaître spontanément.



1858 : Rudolph Virchow affirme que les cellules naissent du résultat de la division cellulaire (« omnis cellula e cellula »)



Microscope utilisé par Hooke
et la coupe de liège qu'il avait
observé



Protozoaire

Proto (premier)

-zoa (animal)

= **protistes** (organismes eucaryotes unicellulaires) hétérotrophes qui ingèrent leur nourriture par phagocytose.

La cellule unique des Protozoaires est plus complexe que la cellule animale typique.

Toutes les fonctions nécessaires à la vie animale sont remplies par cette cellule unique.

LE CONCEPT CELLULAIRE

- Énoncé en 1838 par **Schwann** et **Schleiden**.
- En terme général la **théorie cellulaire** = la cellule est l'unité de vie (tout ce qui est vivant est cellulaire) et contient des organites dans son intérieur.
- Concept facilement accepté par les microscopistes sauf ceux du système nerveux qui persistaient à penser que c'était un "continuum" (une continuité) : une structure sans compartiments séparés.
- **Ramon y Cajal** à partir de 1900 introduit et généralise la **notion de neurone** (cellule nerveuse), faisant du tissu nerveux un tissu comparable aux autres.
- Un **organisme complexe** est constitué de **tissus** possédant **différentes fonctions**, eux-mêmes formant des **organes spécialisés** .

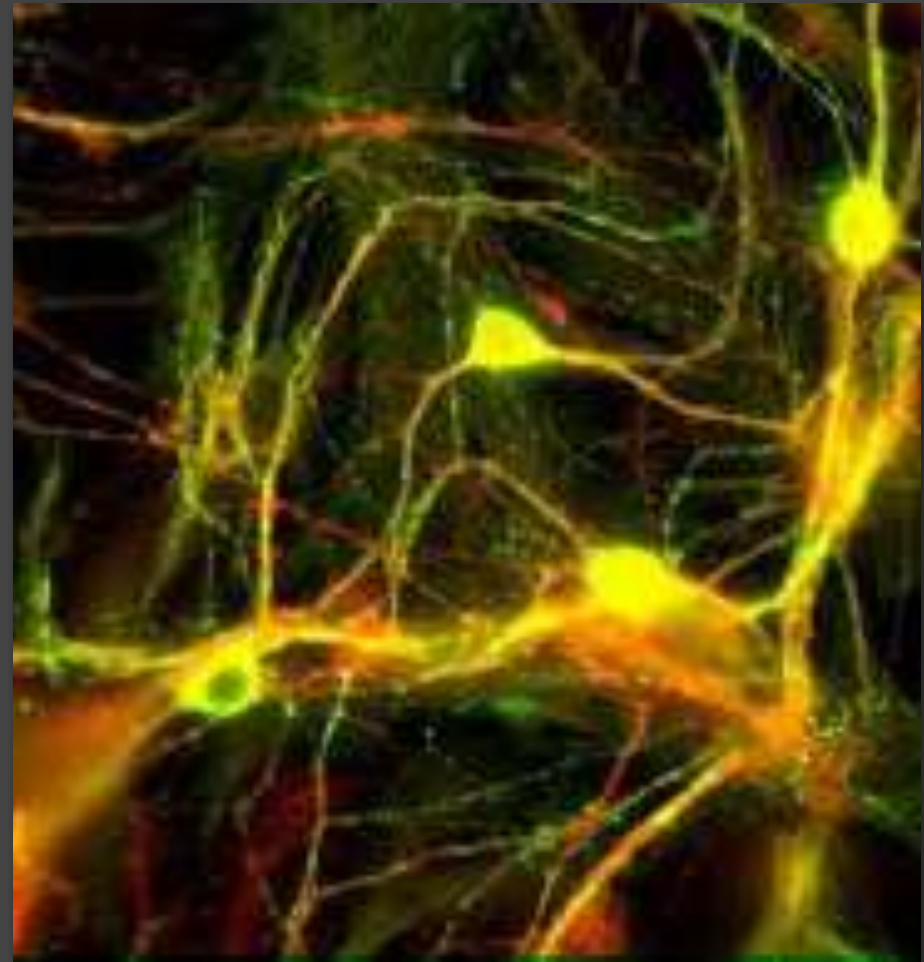
Théorie cellulaire

A detailed 3D illustration of a cell, likely a plant cell, shown in cross-section. The cell is roughly spherical with a thick, textured outer boundary. Inside, various organelles are visible and color-coded: a large, orange, spherical nucleus is positioned in the upper right; a network of blue, tubular structures (endoplasmic reticulum) surrounds the nucleus; several green, bean-shaped structures with internal folds (mitochondria) are scattered throughout the cytoplasm; and a large, clear, vacuole-like structure is visible in the lower left. The overall background is a dark blue, suggesting the cytoplasm.

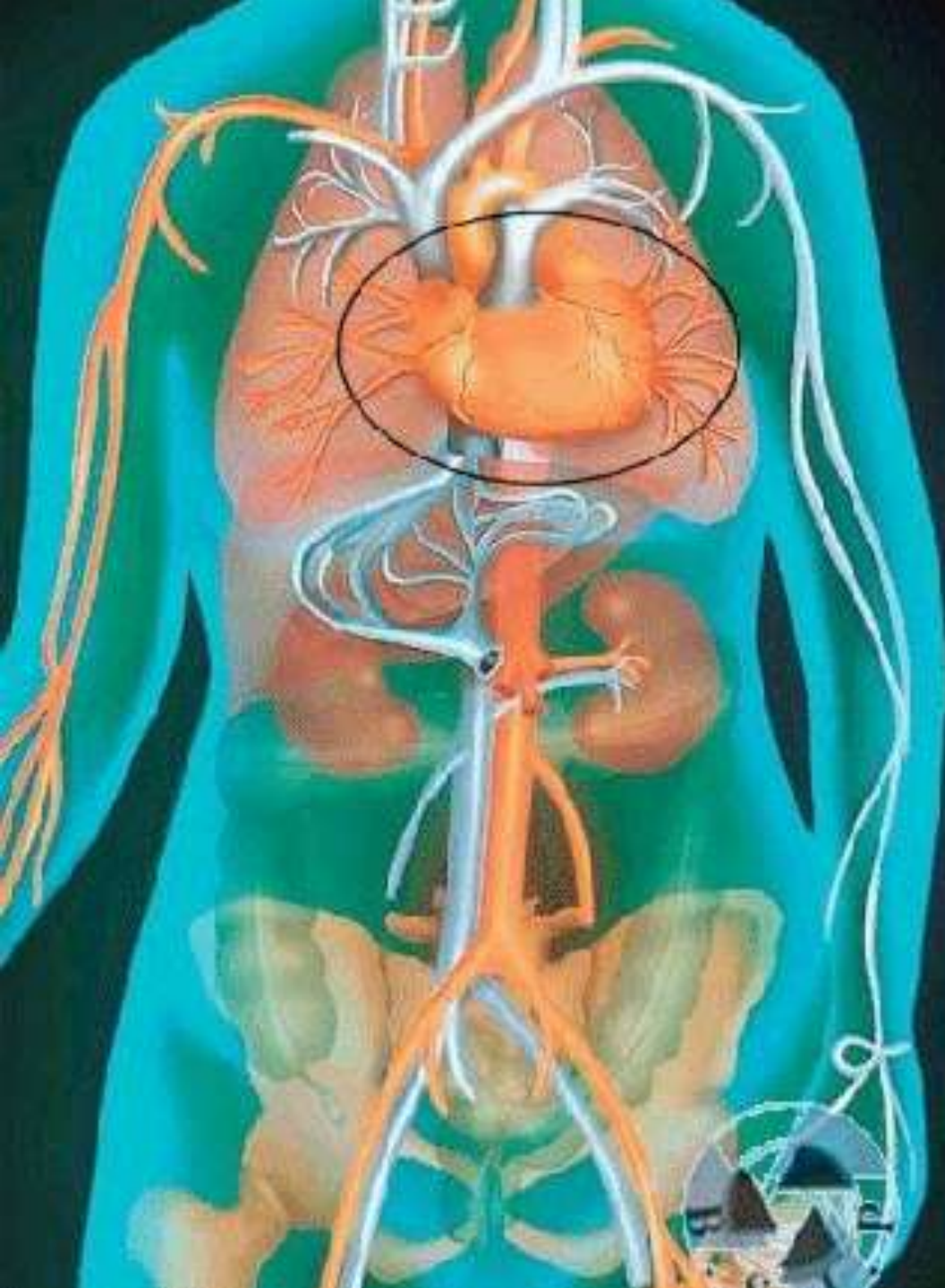
- La cellule est l'unité constitutive des organismes vivants. Elle en est aussi l'unité fonctionnelle.
- L'organisme dépend de l'activité des cellules isolées ou groupées en tissus pour assurer les différentes fonctions.
- Les activités biochimiques des cellules sont coordonnées et déterminées par certaines structures présentes à l'intérieur des cellules.
- La multiplication des cellules permet le maintien des organismes et leur multiplication.



Tissu nerveux



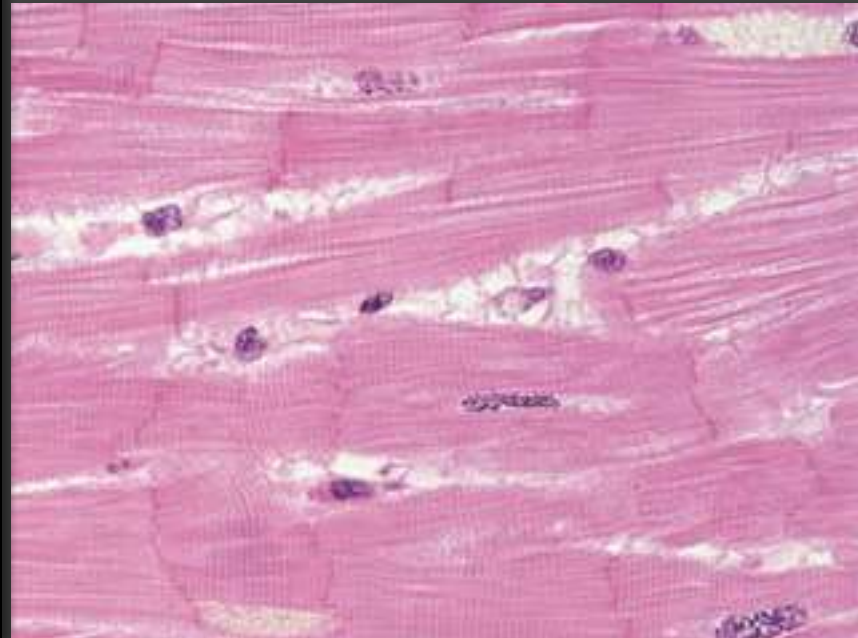
**Cellules nerveuses =
Neurones**



Organisme
Organes
Tissus



Coeur



Tissu cardiaque (myocarde)

Organisme

Organes

Tissus

Cellules (se différencient pour former des tissus et des organes spécialisés)

+ Matrice extracellulaire
Organites

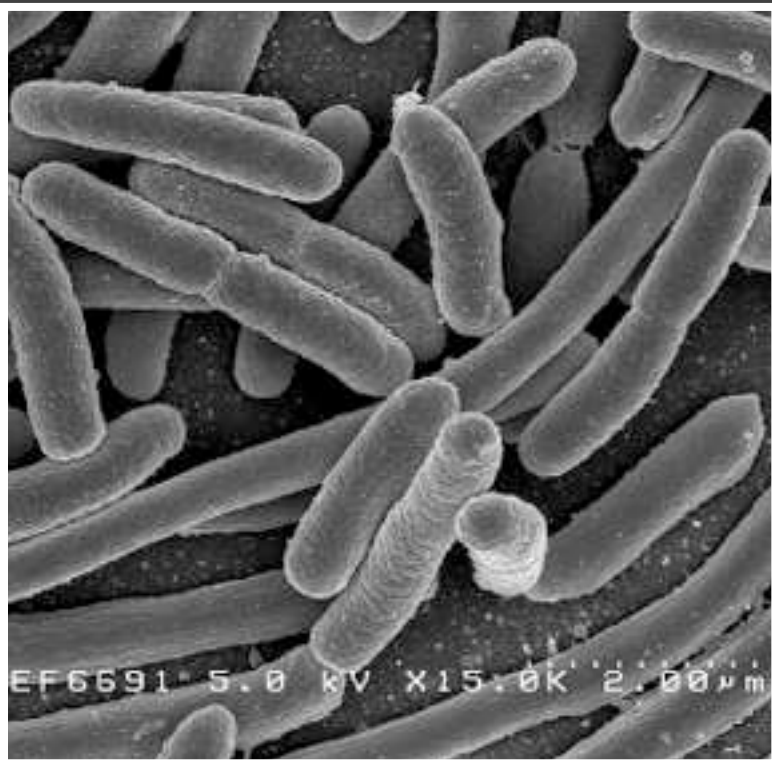
**Molécules biologiques (Protéines ,
lipides, Glucides)**

Figure 1. La hiérarchie du vivant

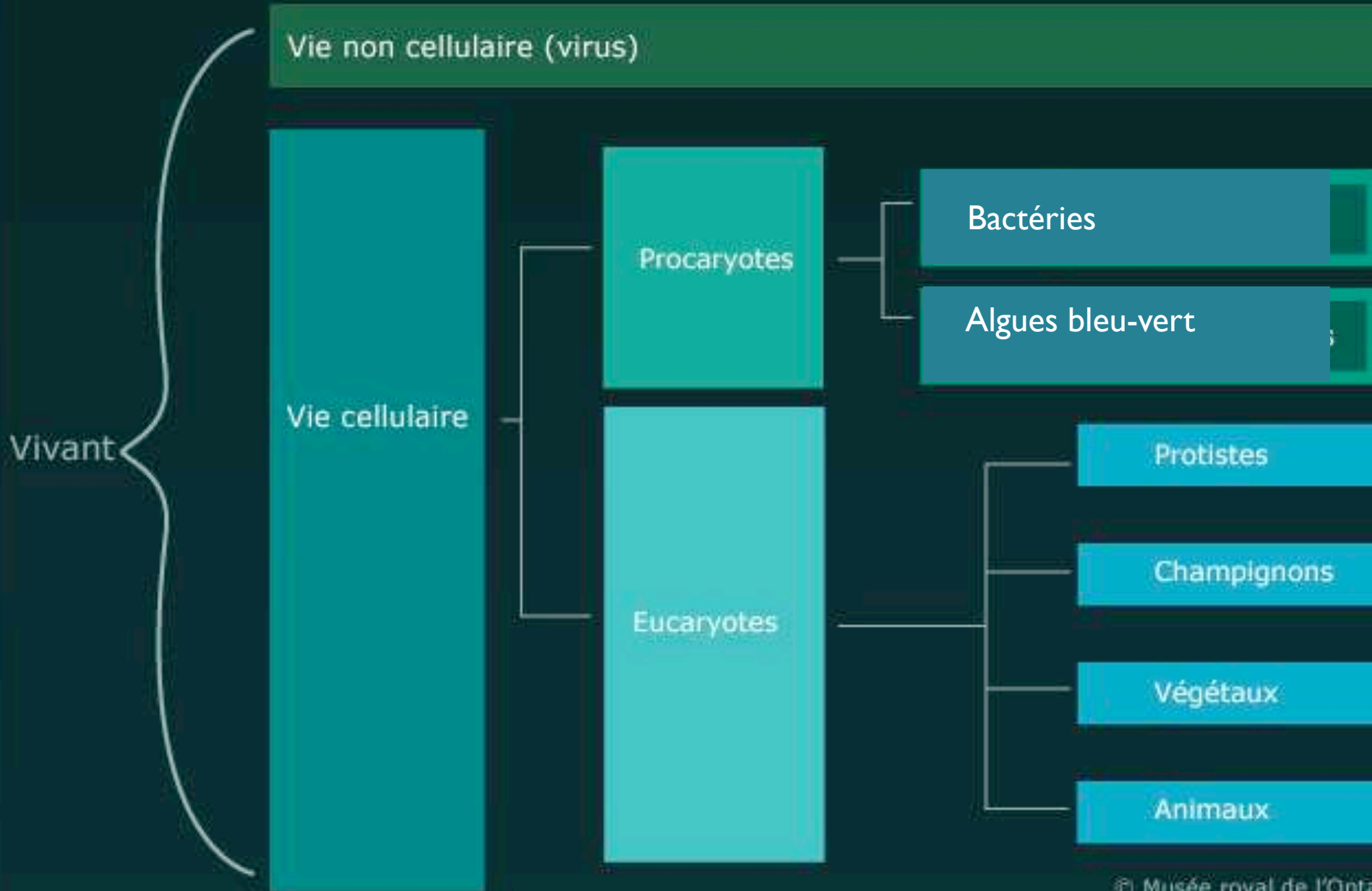
Il existe deux grands types d'organismes:

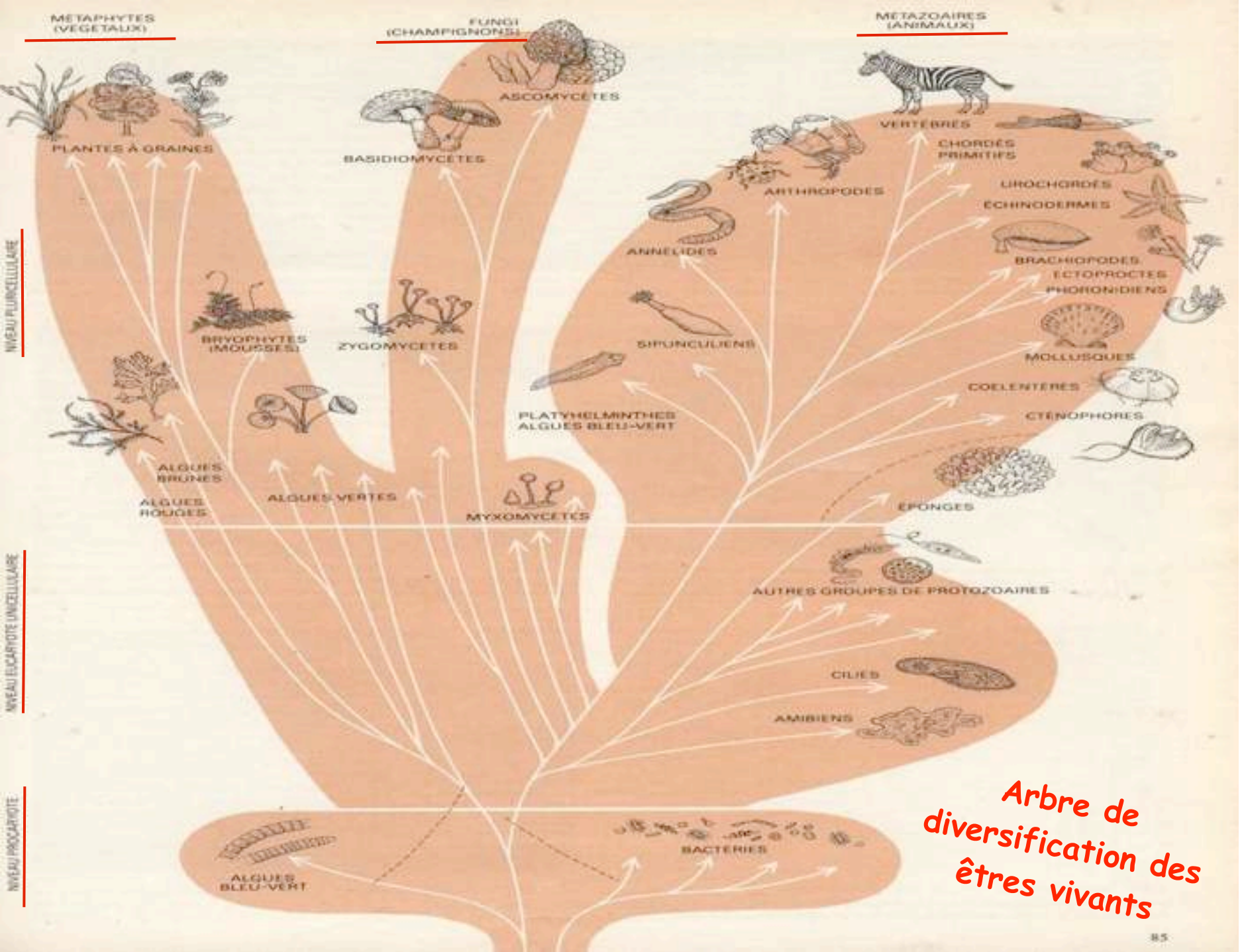
Les Procaryotes (du grec, pro, avant et karyon, noyau) = êtres vivants unicellulaires, caractérisés par une absence de noyau et d'organites.

Les Eucaryotes (eu, propre) = êtres vivants uni ou pluricellulaires, possédant un noyau et des organites.



Les divisions du vivant





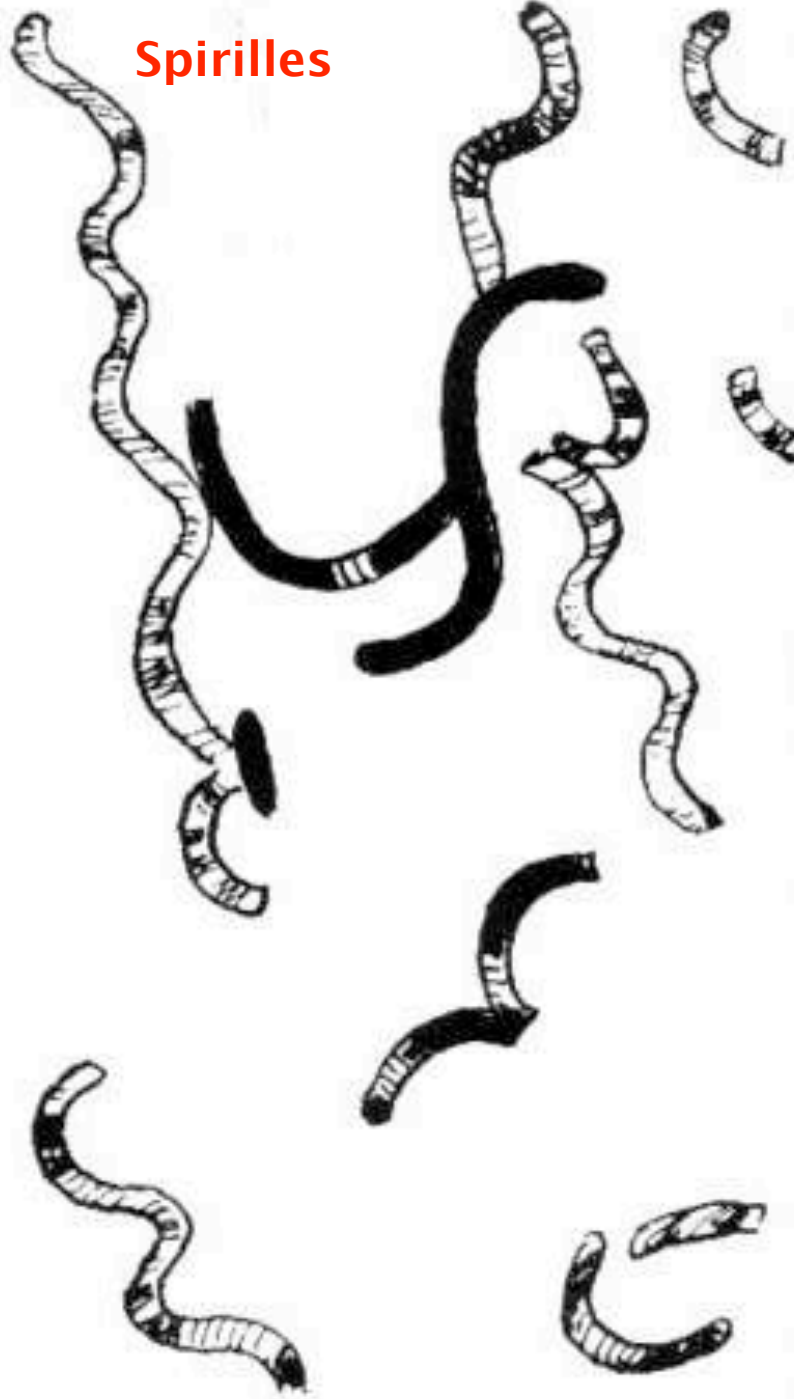
Cellules procaryotes: les bactéries & cyanobactéries

- L'étude des **bactéries** s'est surtout développée au XIXème siècle, avec les travaux de Louis Pasteur (France) et de Robert Koch (Allemagne). Le terme « procaryote » trouve toute sa signification dans les années 1950, lorsque le **microscope électronique** montre l'absence de noyau vrai dans la cellule.
- La plupart des bactéries possèdent une paroi cellulaire glucidique (= le peptidoglycane). Les bactéries les plus grosses mesurent plus de 2 µm.
- Les bactéries présentent de nombreuses formes: sphériques (coques), allongées ou en bâtonnets (bacilles), des formes plus ou moins spiralées.
- L'étude des bactéries est la bactériologie, une branche de la microbiologie.

Coques



Spirilles



Bacilles





Streptocoque



Staphylocoque



Treponema pallidum



Angines



Panaris



Syphilis



Salmonelles (*Salmonella typhimurium*)

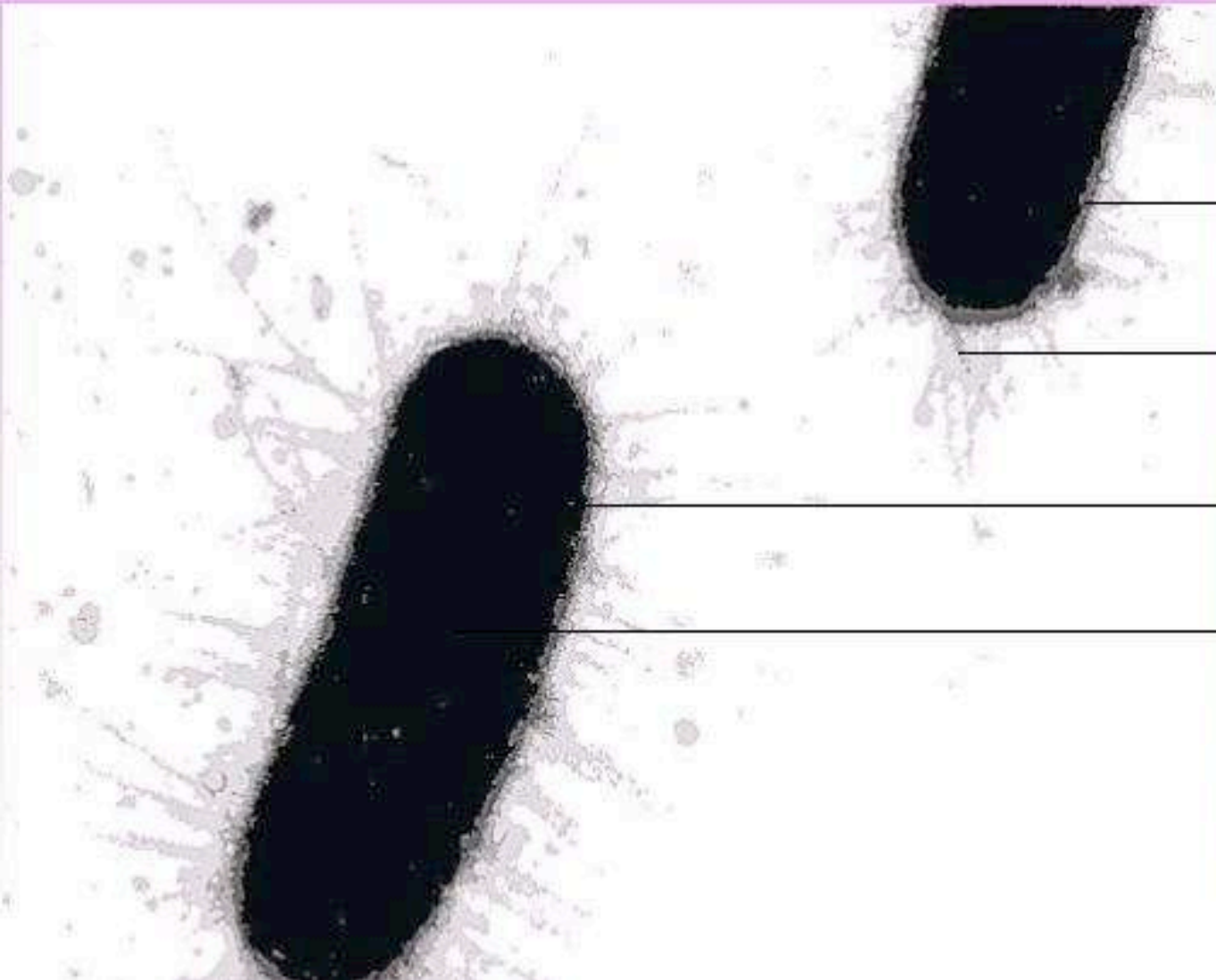


Les bactéries sont ubiquitaires et sont présentes dans tous les types de biotopes rencontrés sur Terre:

- sol,
- eaux douces, marines ou saumâtres,
- air,
- peau et intestin des animaux.

Les bactéries ont une importance considérable dans les cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone et la fixation de l'azote de l'atmosphère.

**Cellule Procaryote : Bactérie de type bacille (*Escherichia coli*)
observée en microscopie électronique à transmission (x 35 000)**

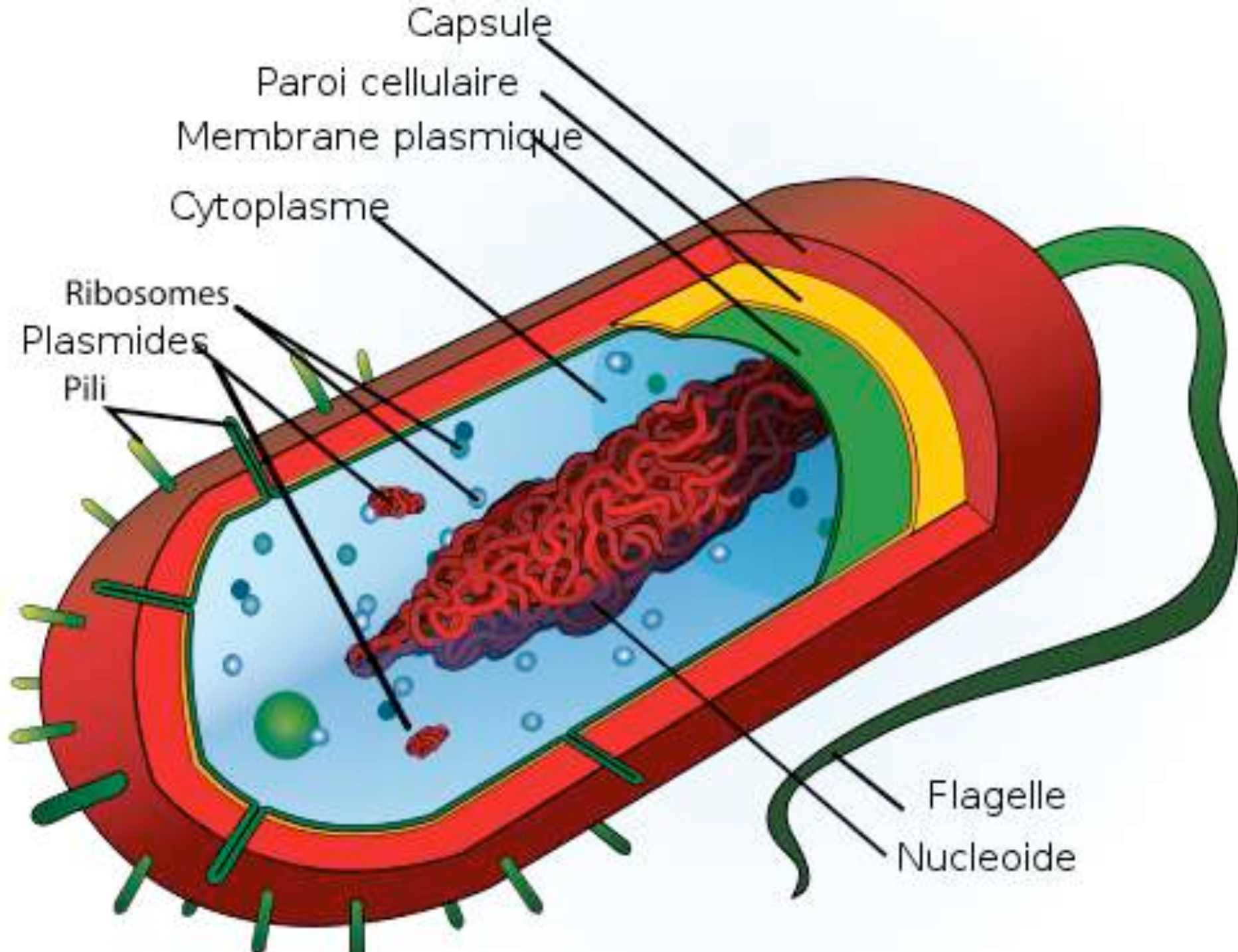


paroi
bactérienne

flagelles ou cils

membrane
plasmique

cytoplasme
contenant une
"zone nucléaire"



Structure cellulaire

- Les bactéries possèdent :
 - un chromosome circulaire sous forme de filament d'ADN.
 - des molécules d'ADN circulaire extra-chromosomiques (= plasmides).
 - de nombreux ribosomes.
 - des substances intracellulaires de réserve (dans le cytosol).

Cyanobactérie = cyanophycée

- procaryote photoautotrophe de coloration bleue-verte ou violet sale, capable de photosynthèse (utilisent et exploitent l'énergie de la lumière), contrairement aux hétérotrophes (bactéries, protozoaires, zooplancton, mammifères) qui ne peuvent pas produire leur propre matière organique à partir de l'énergie solaire.

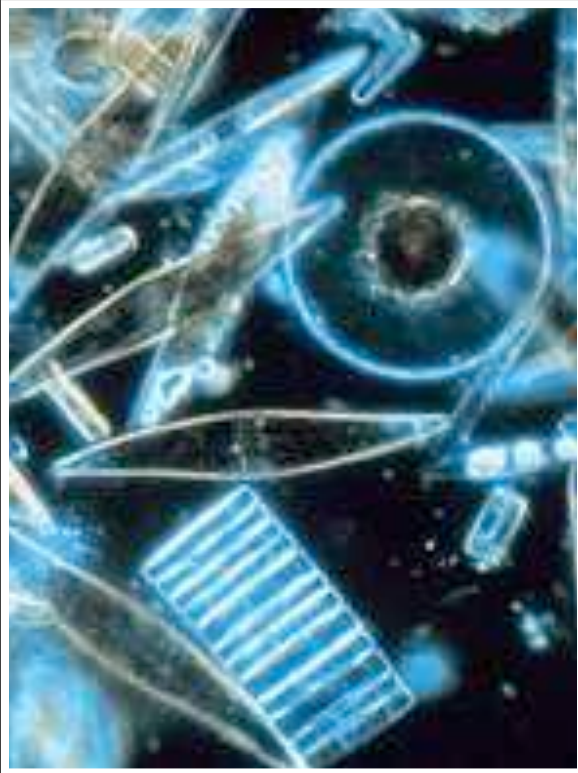


Cellules eucaryotes

- Organismes unicellulaires:
- Leur diversité est très grande :
 - algues unicellulaires (phytoplancton),
 - levures (champignons)
 - Paramécies (protozoaires).
- Organismes pluricellulaires:
Formés d'une communauté de cellules interdépendantes

CELLULES EUCARYOTES:

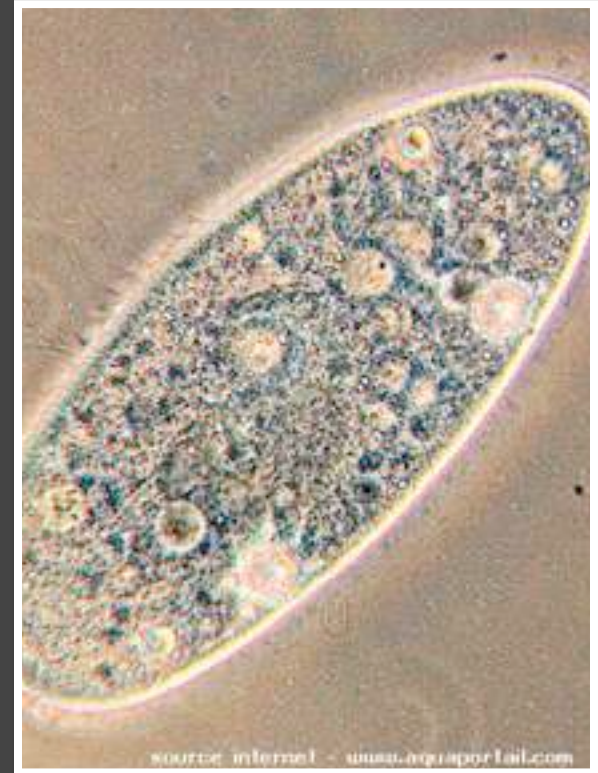
- Organismes unicellulaires:



**algues
unicellulaires
(phytoplancton)**



**levures
(champignons)**



**Protozoaire:
Paramécie**



Amibe : Amoeba proteus

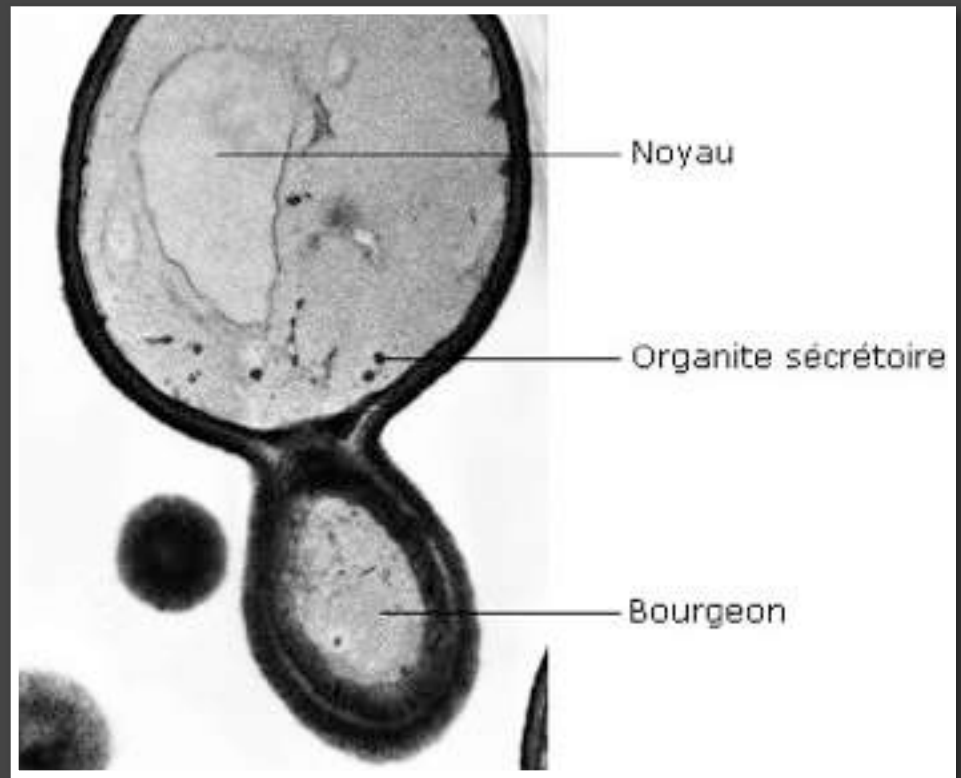
= êtres vivants unicellulaires **eucaryotes** anciennement classés parmi les Protozoaires.

Elles sont caractérisées par un **corps cellulaire déformable** émettant des **pseudopodes** (prolongements de forme changeante), qui leur permettent de **ramper** sur un support ou de capturer des proies microscopiques par **phagocytose**.

= **espèces** libres vivant des les eaux, les sols humides, certaines peuvent être à l'origine de **pathologies** diverses.

levure

Saccharomyces cerevisiae (Image en microscopie électronique)



= **champignons microscopiques unicellulaires** (ou très faiblement pluricellulaires) qui se multiplient par **bourgeonnement**.

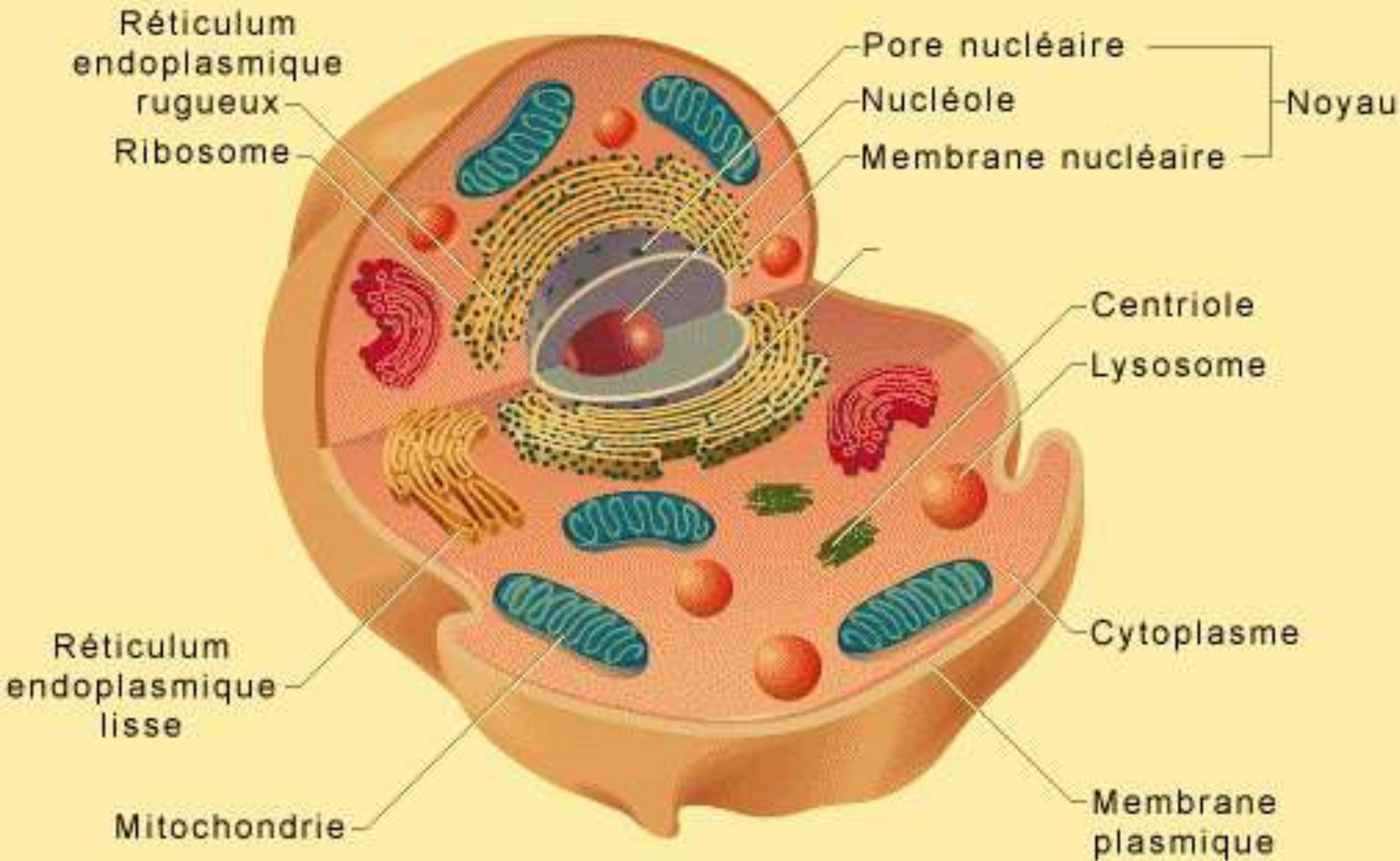
Elles ont la capacité de fermenter des matières organiques, minérales ou végétales pour produire des substances variées (pain, bière ...).

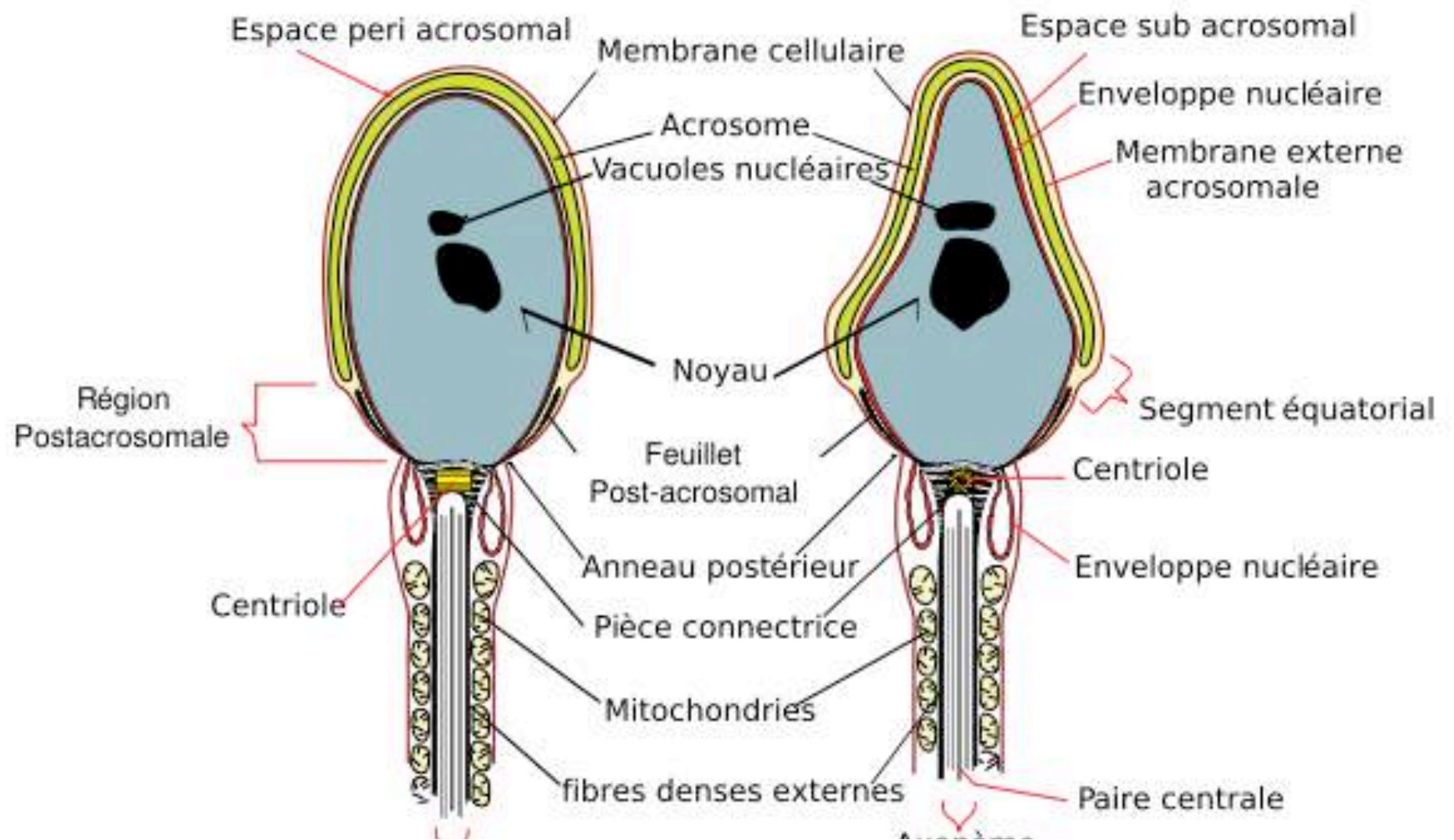
L'activité chimique des levures provoque le dégagement de bulles de gaz carbonique et fait lever la pâte à pain.



- Organismes pluricellulaires

Structure d'une cellule eucaryote animale







Un ovule entouré de spermatozoïdes



Le matériel génétique est dans la tête du spermatozoïde. Il entre dans l'ovule tête première.

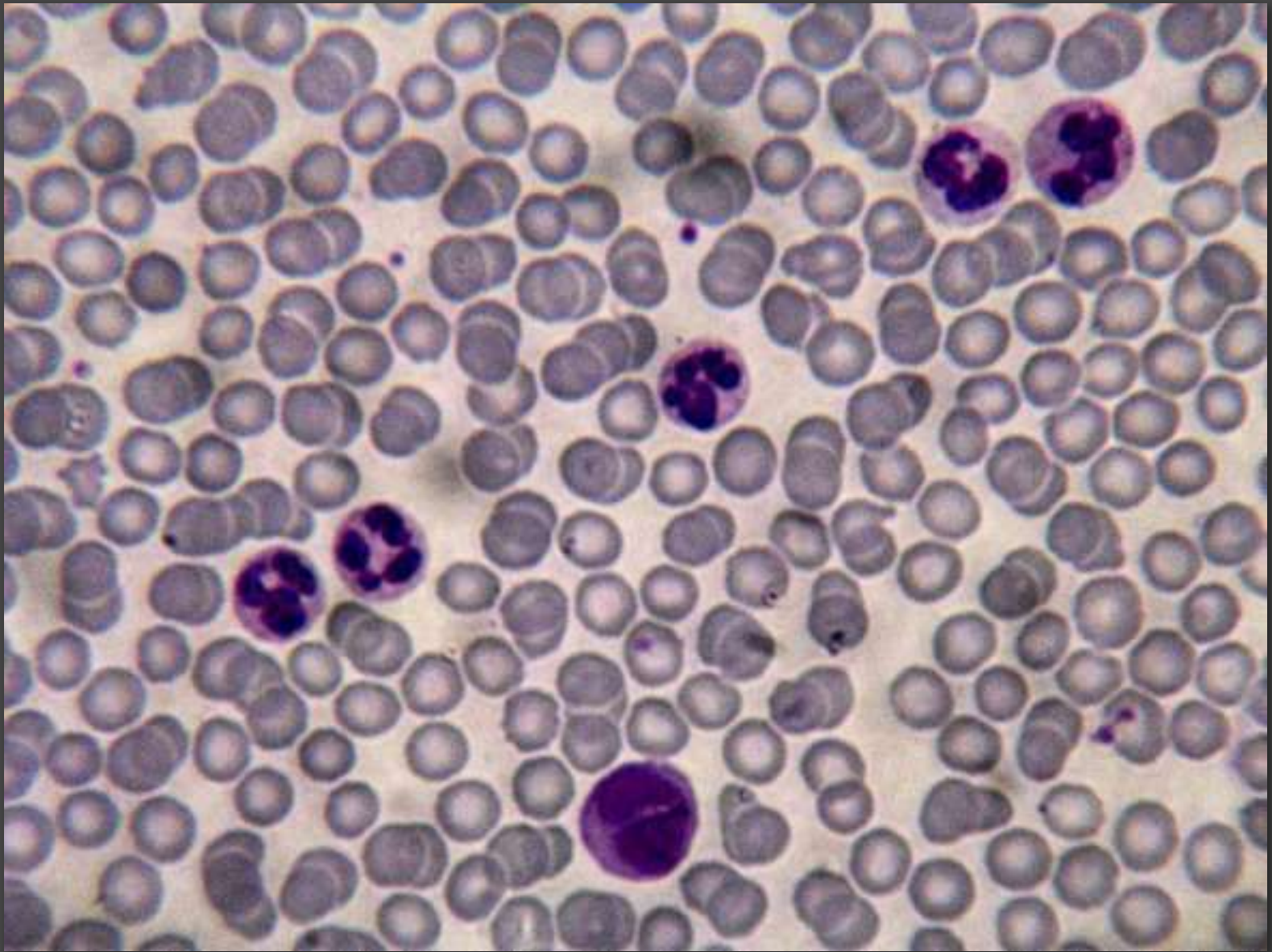


© ICPB 1998 / Françoise Collet

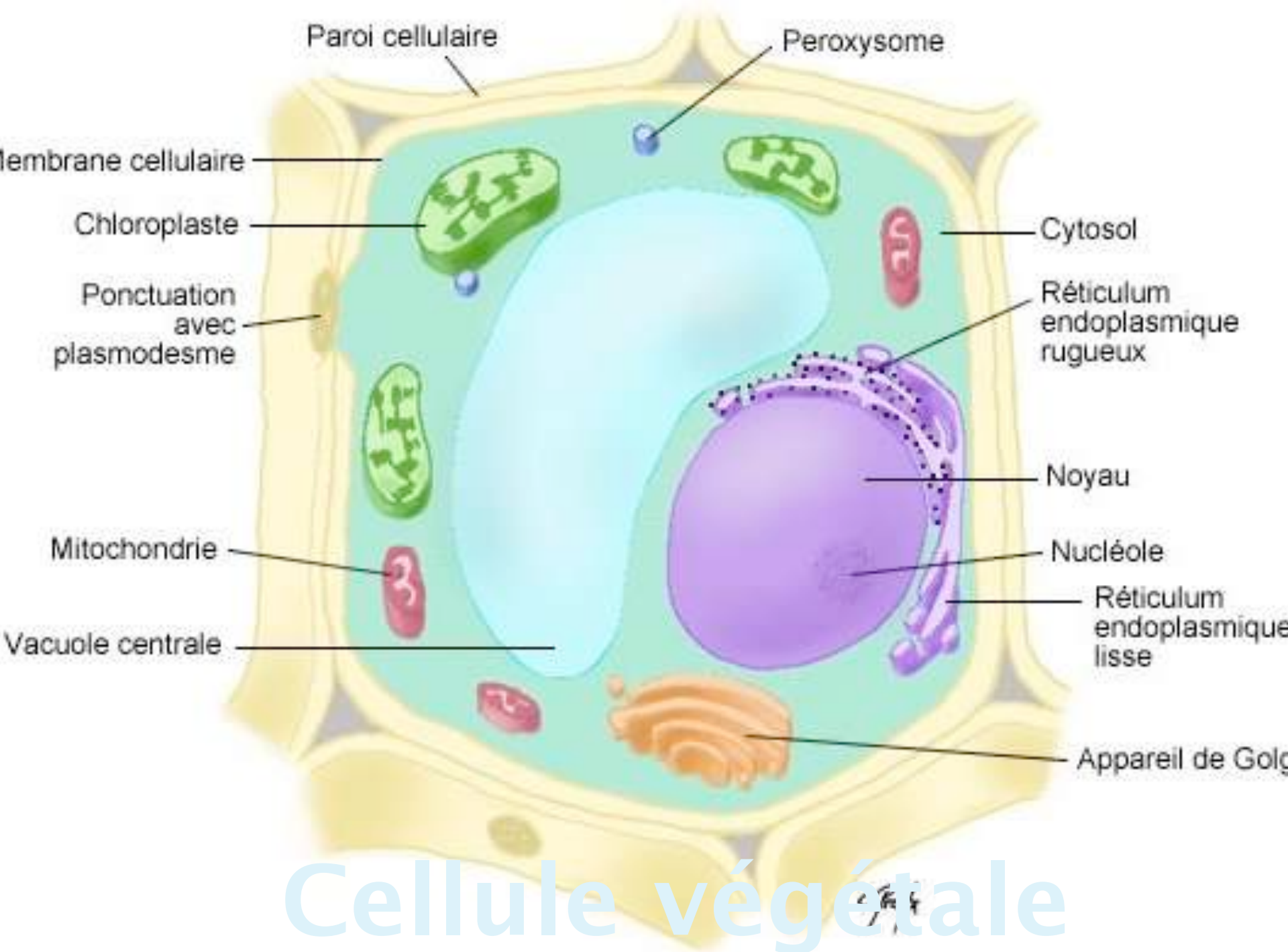
Cellule humaine: muqueuse buccale. Colorée à l'eau iodée.



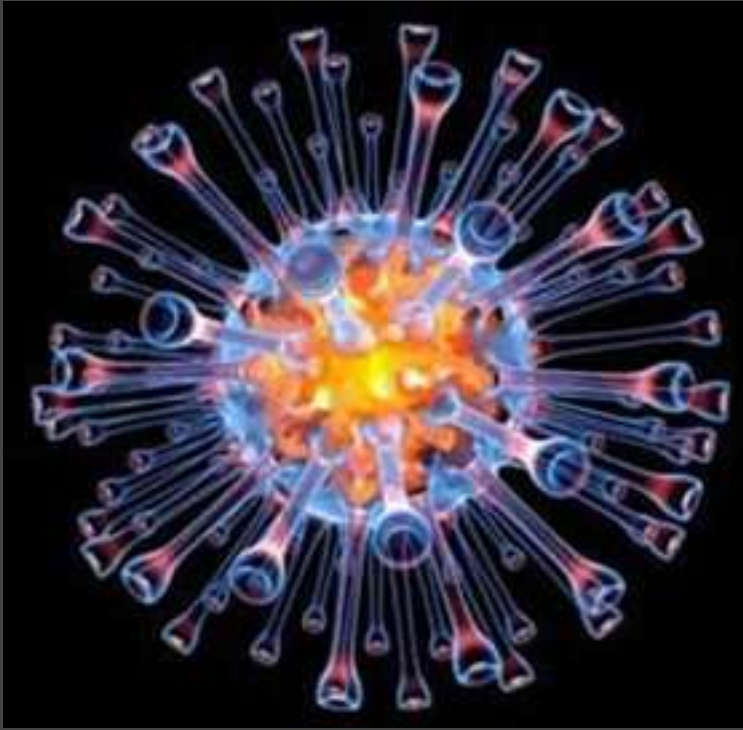
Cellules sanguines humaines: les hématies (Globule rouges)



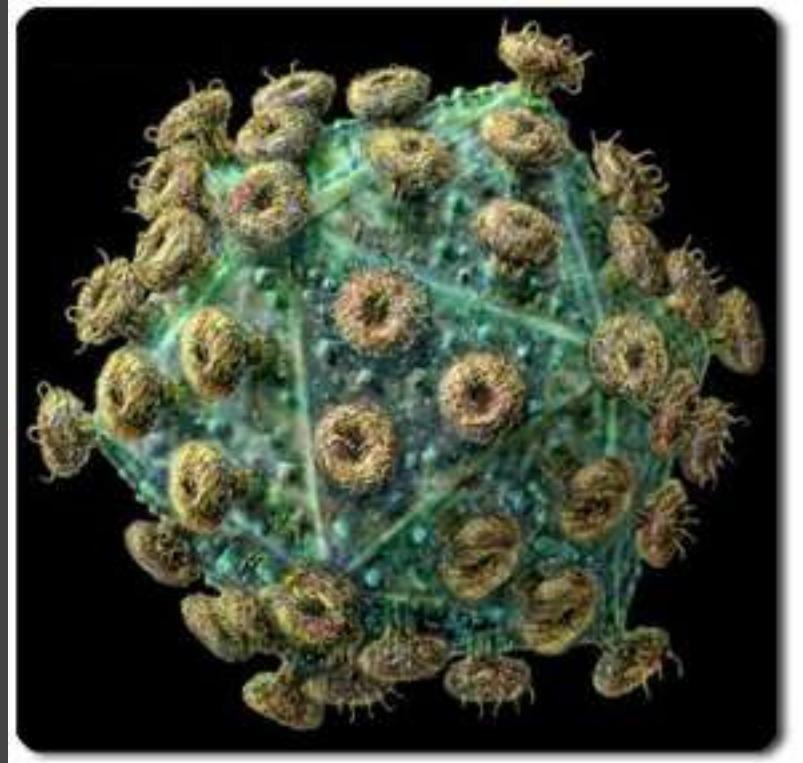
Cellules sanguines humaines: les leucocytes (Globules blancs)



Cellule végétale



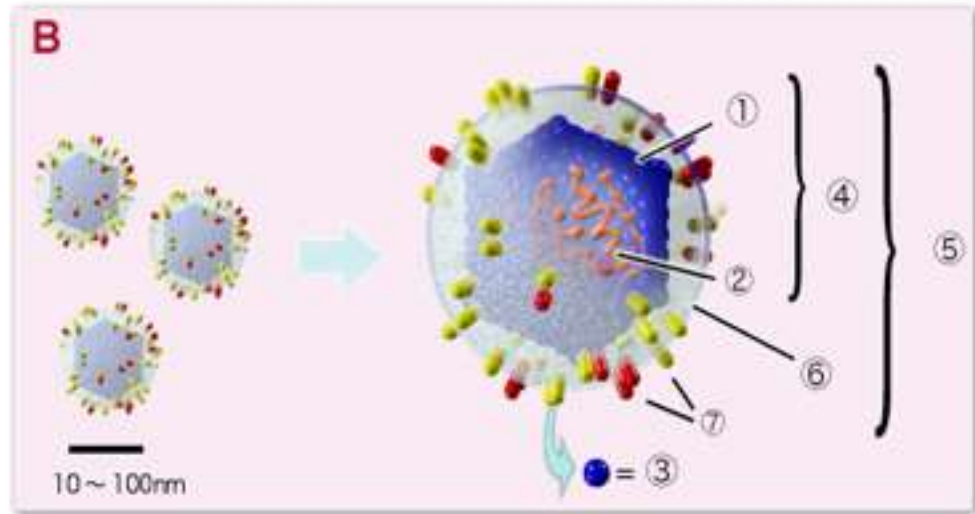
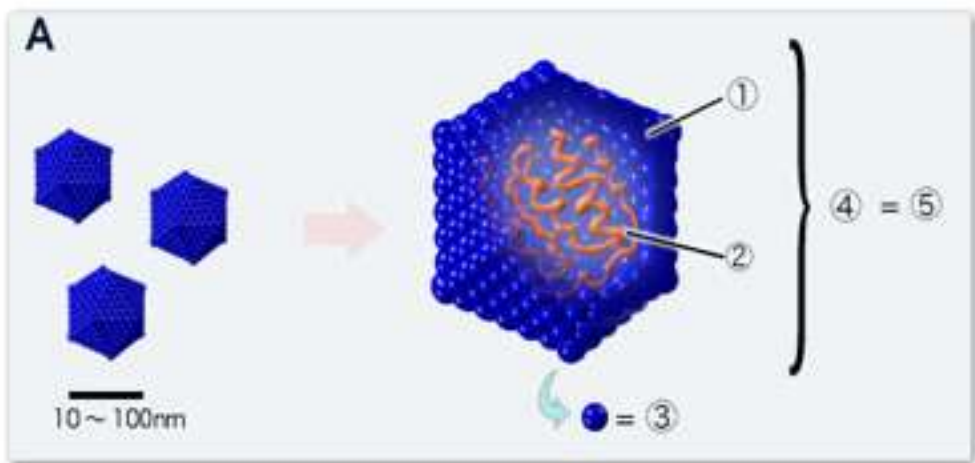
Virus H1N1 de la grippe porcine



Virus(HIV) : Immunodéficience Humaine

virus

Particule microscopique infectieuse qui nécessite une [cellule hôte](#) pour se [multiplier](#).



Un **virus** se caractérise par son incapacité à se multiplier seul par division.

Il a besoin d'utiliser une cellule hôte : un virus est un parasite intracellulaire obligatoire.

Il est composé d'une ou plusieurs molécules d'ADN, ou d'ARN entourées d'une coque de protéines, appelée la capside, et, parfois, d'une enveloppe.

LE NOYAU CELLULAIRE



Pr. Boutaina BELQAT

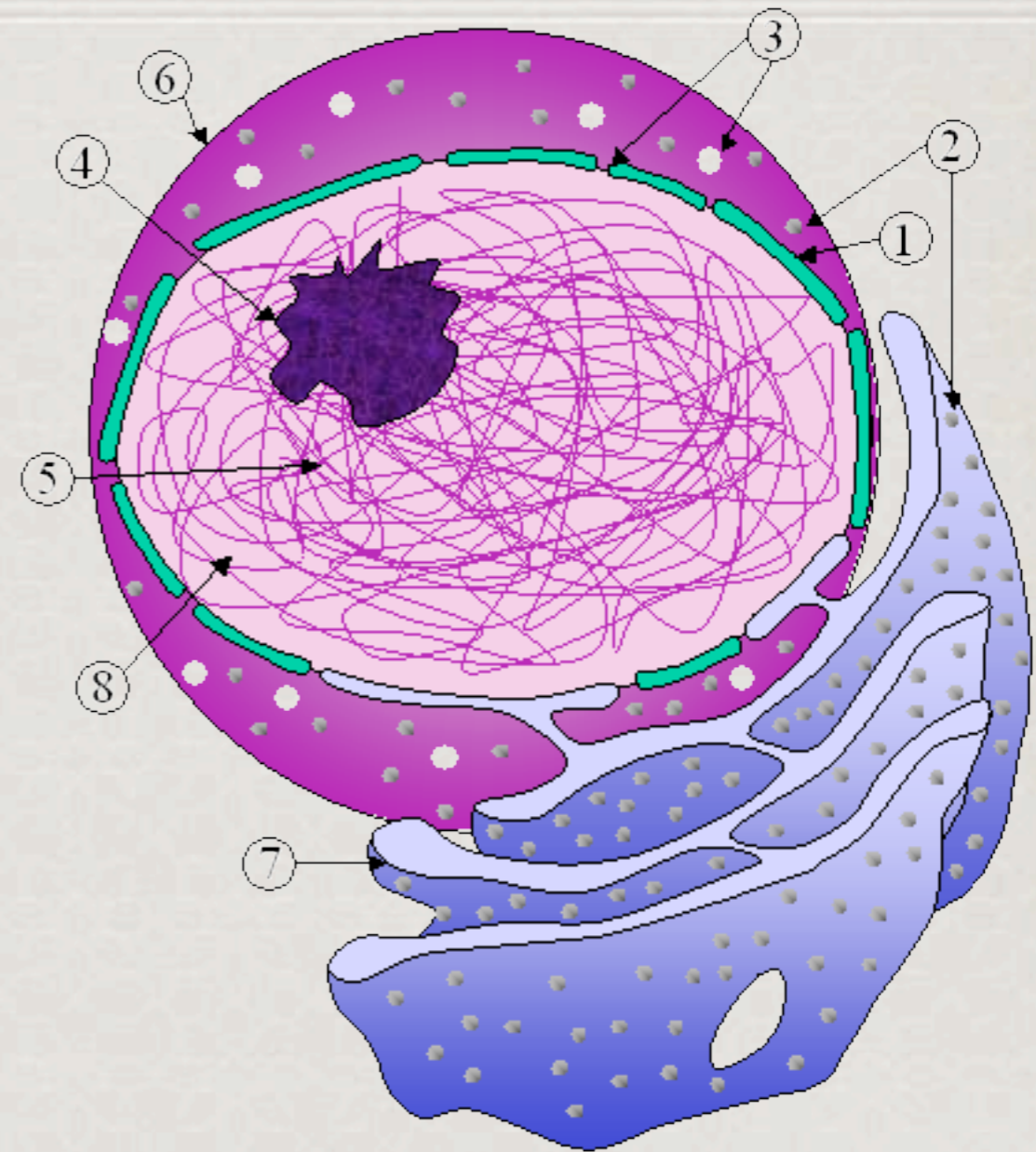
Définition

Le noyau est un **organite**, présent dans les **cellules eucaryotes**, et contenant le matériel **génétique** de la cellule (ADN).

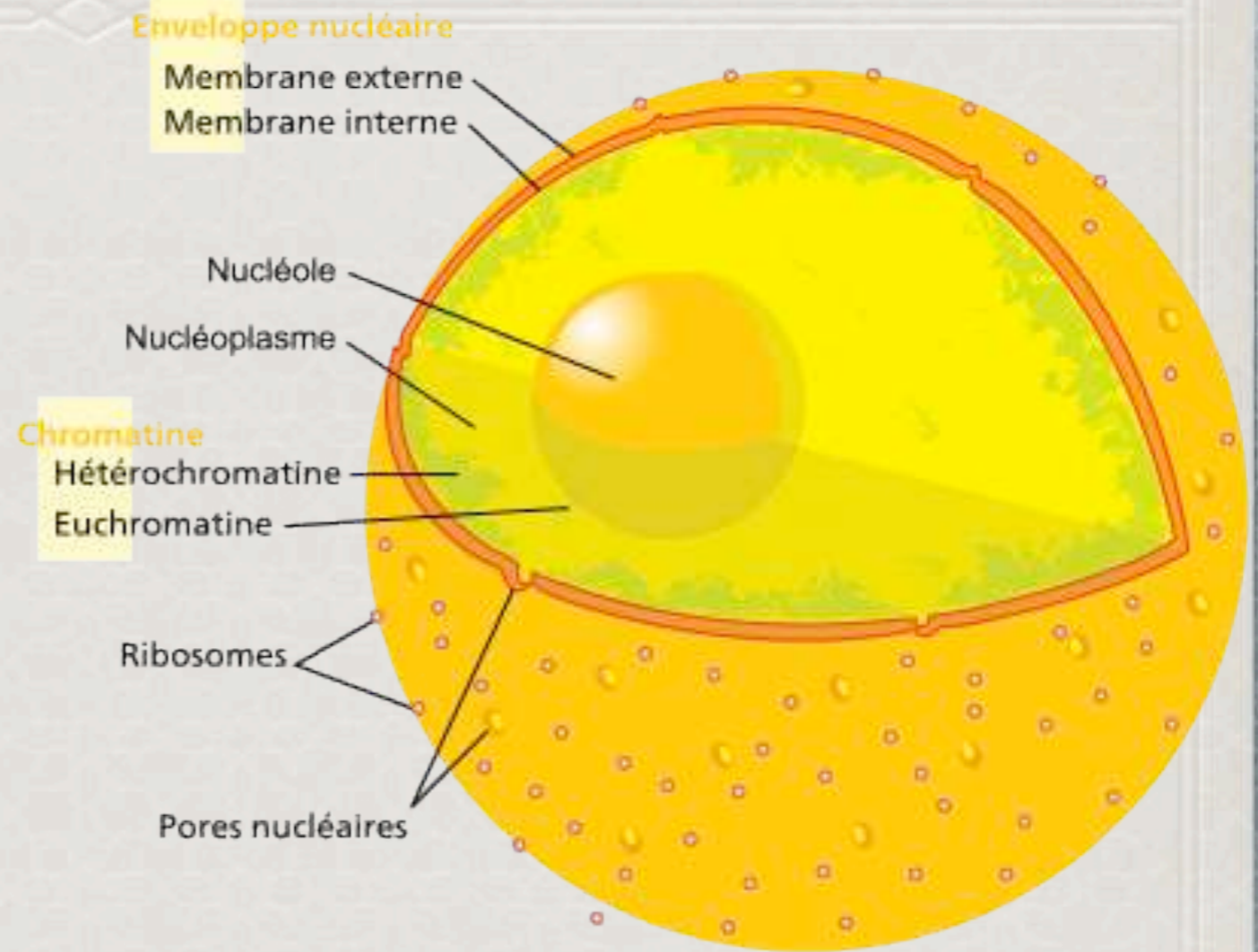
Il a deux fonctions principales :
- contrôler les réactions chimiques du **cytoplasme** et,

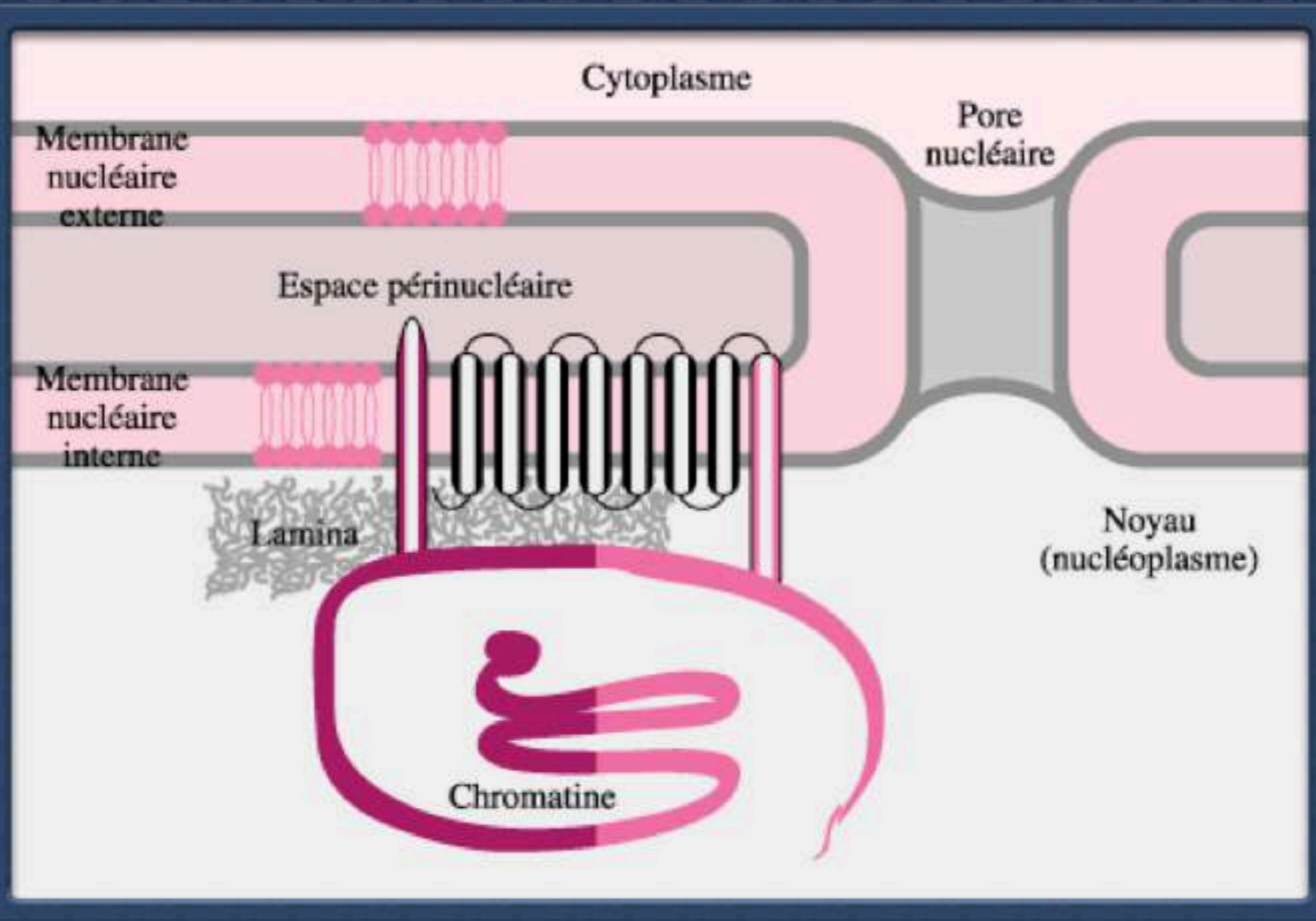
- stocker les informations nécessaires à la **division cellulaire**.

- ✿ Il a un diamètre variant de 5 à 7 micromètres, ce qui fait de lui le plus grand des organites.



Membrane nucléaire





La lamina nucléaire = réseau protéique fibreux, qui double la membrane interne de l'enveloppe nucléaire formant une couche de 10 à 20 nm d'épaisseur et interrompue par des pores nucléaires.

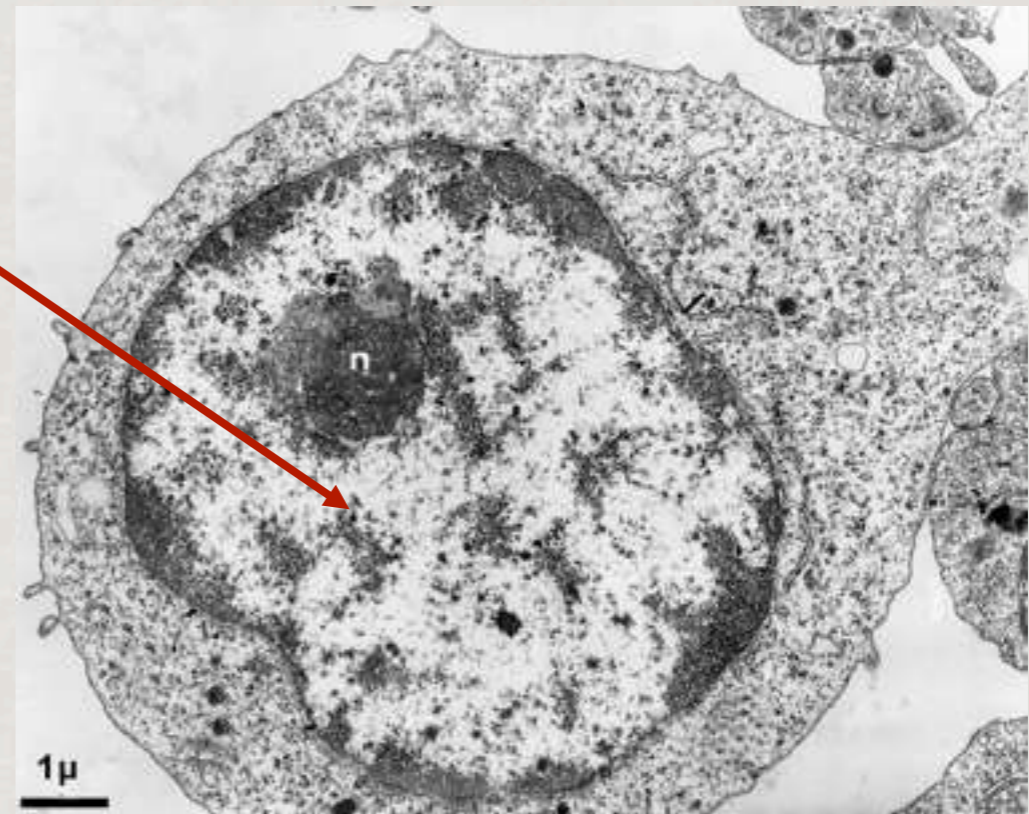
Rôle de la lamina

- ***La lamina:***
 - ***donne sa forme au noyau,***
 - ***rend rigide l'enveloppe nucléaire et,***
 - ***joue un rôle dans le disparition et la reconstitution de la membrane nucléaire lors de la division cellulaire***
 - ***sert aussi à la fixation des chromatides à la périphérie du noyau***

Le nucléoplasme

Le nucléoplasme est un liquide de consistance gélatineuse (qui apparaît grisâtre ponctué de noir en microscopie électronique) contenu dans le noyau délimité par l'enveloppe nucléaire.

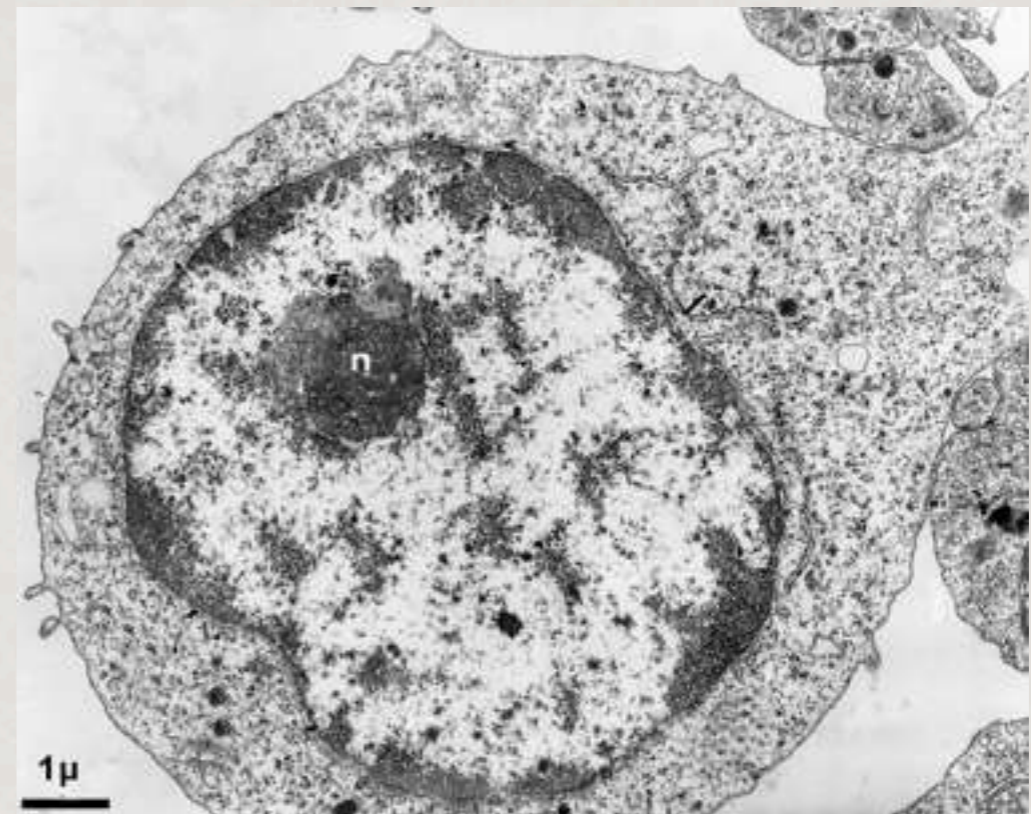
- ✿ Il contient en moyenne entre 70 % et 90 % d'eau et son pH est proche de 7.



Le nucléoplasme

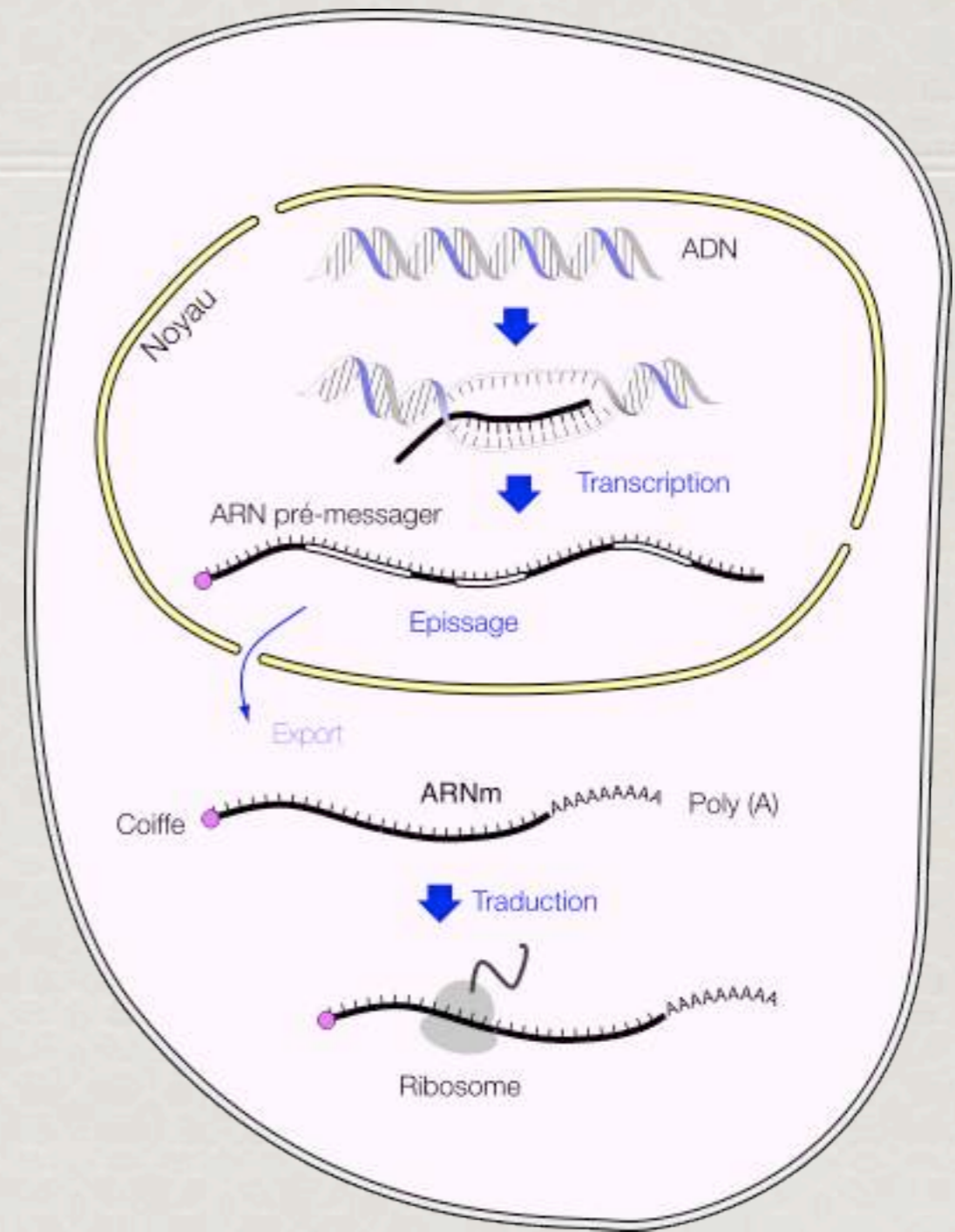
- ✿ Le nucléoplasme contient:
 - ✿ nucléotides triphosphates,
 - des [enzymes](#),
 - ✿ des protéines et des facteurs de transcription.

Il renferme la quasi totalité de l'[information génétique](#) (2 mètres d'[ADN double brin](#) enfermés dans la [chromatine](#) (complexe ADN-protéines)).



La transcription de l'ADN en ARN pré-messager se déroule dans le nucléoplasme

- L'acide ribonucléique messenger, ARN messenger ou ARNm est une copie transitoire d'une portion de l'ADN correspondant à un ou plusieurs gènes.
- L'ARNm est utilisé comme intermédiaire par les cellules pour la synthèse des protéines.



Chromatine

La chromatine est la forme sous laquelle se présente l'ADN dans le noyau.

C'est la substance de base des chromosomes eucaryotes, elle correspond à l'association:

ADN + ARN + Protéines

Les protéines sont de deux types :

- histones (protéines très riches en aa basiques) et,
- protéines non-histones, non liées à l'ADN.

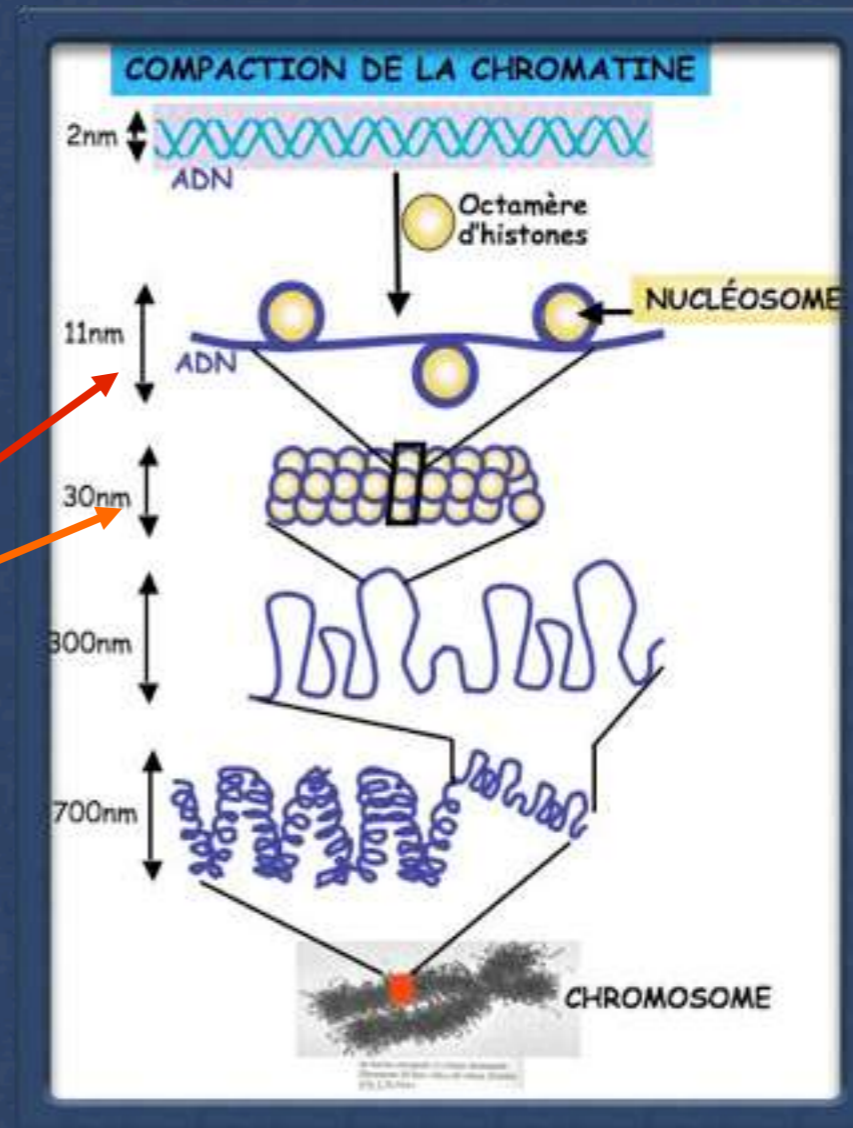
Il y a deux types de chromatine : l'euchromatine et l'hétérochromatine.



Les **nucléosomes** = Enroulement de l'**ADN** autour de disques protéiques octamères (assemblage de 8 molécules d'**histones** H2A, H2B, H3 et H4)

Ils constituent une structure en collier de perles.

Avec l'addition d'histones H1, le filament nucléosomique, appelé aussi la **fibres de 10 nm** est à son tour compacté sous forme de **fibres de 30 nm** de diamètre, constituant l'**unité de base de la chromatine**.



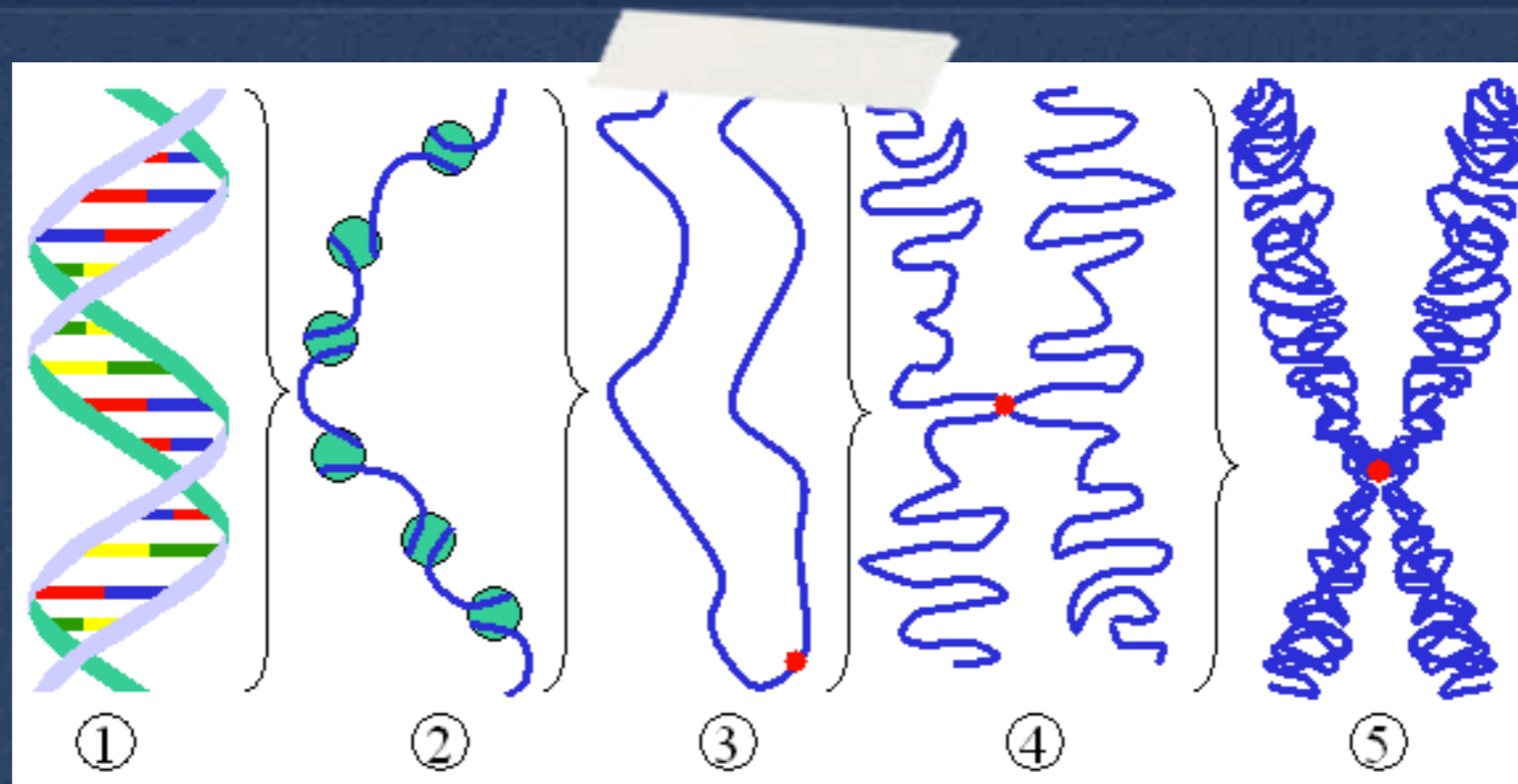
Deux types de chromatine

- *L'**euchromatine**, qui consiste en ADN actif, de structure globalement décondensée permettant l'expression génique.*

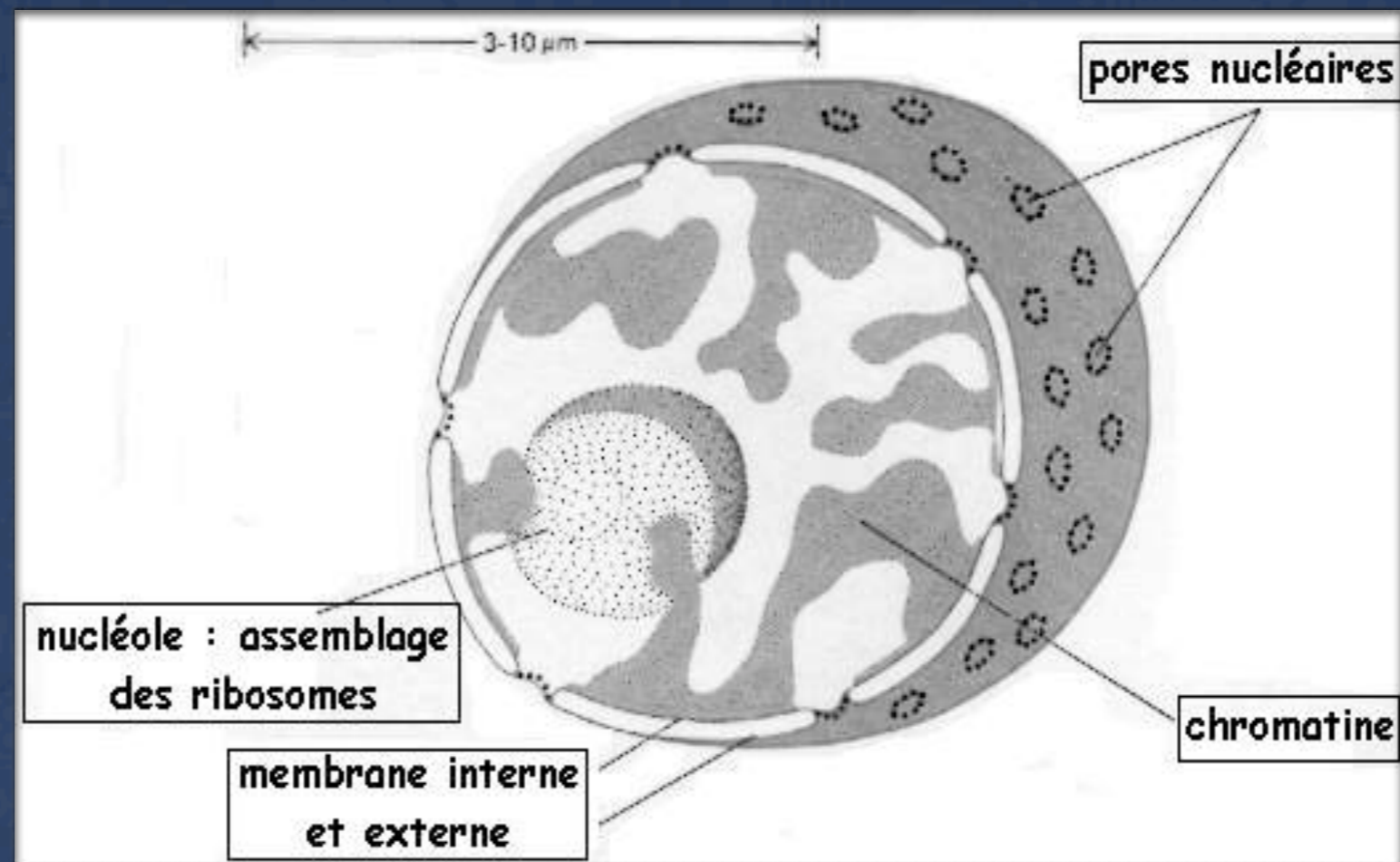


- *L'**hétérochromatine**, régions d'ADN condensé qui consiste en ADN principalement inactif. Il semble servir à des fins structurelles durant les phases chromosomiques.*

Différents niveaux de condensation de l'ADN



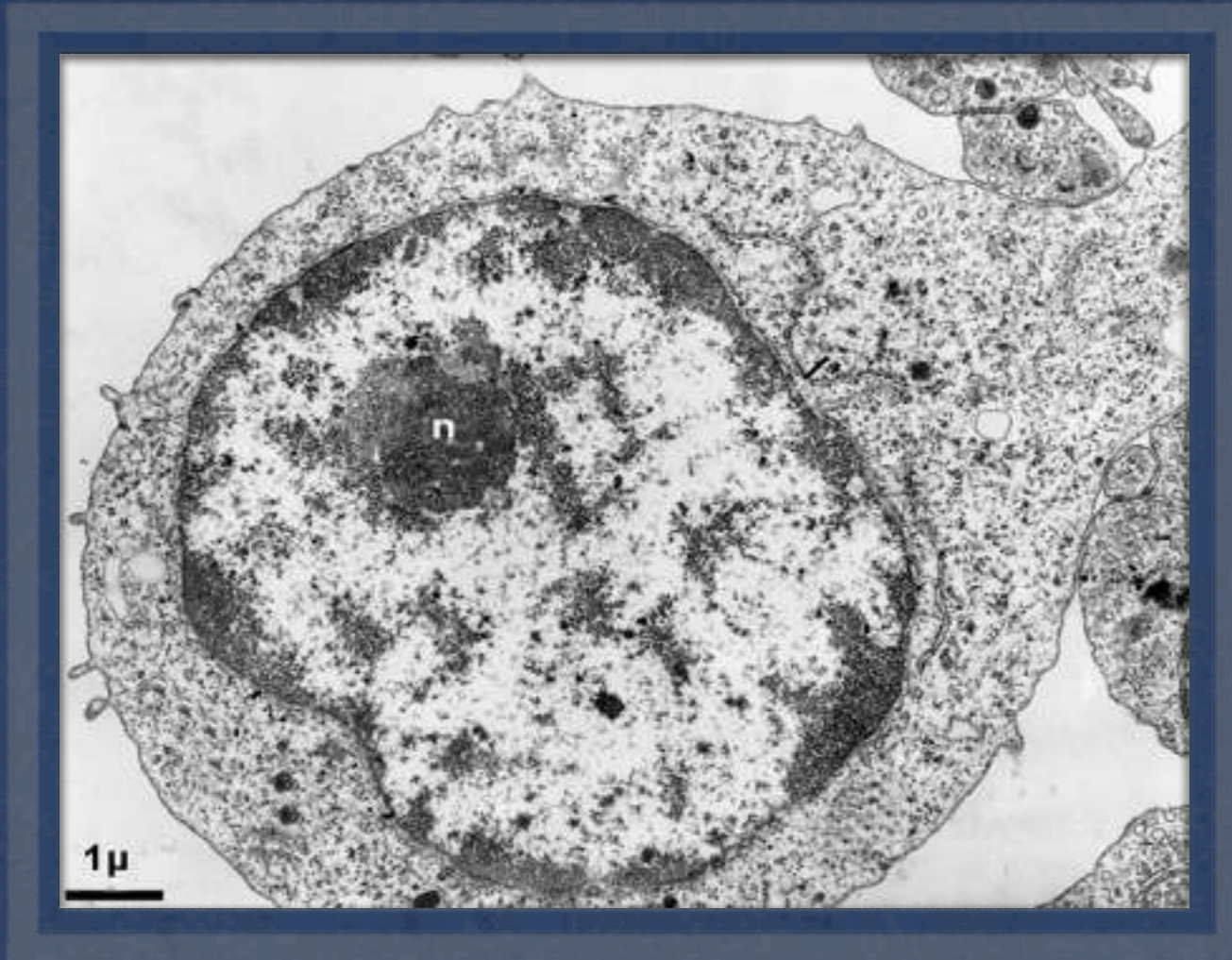
Differents niveaux de condensation de l'ADN. (1) Single DNA strand. (2) Chromatin strand (DNA with histones). (3) Chromatin during interphase with centromere. (4) Condensed chromatin during prophase. (Two copies of the DNA molecule are now present) (5) Chromosome during metaphase.



= un **organite** cellulaire **eucaryote situé** dans le noyau. *Il n'est pourtant pas entouré d'une membrane lipidique et n'est donc pas séparé physiquement du noyau.*

*Il est observable au **microscope optique** et électronique et disparaît au cours de divisions cellulaires.*

Fonction du nucléole



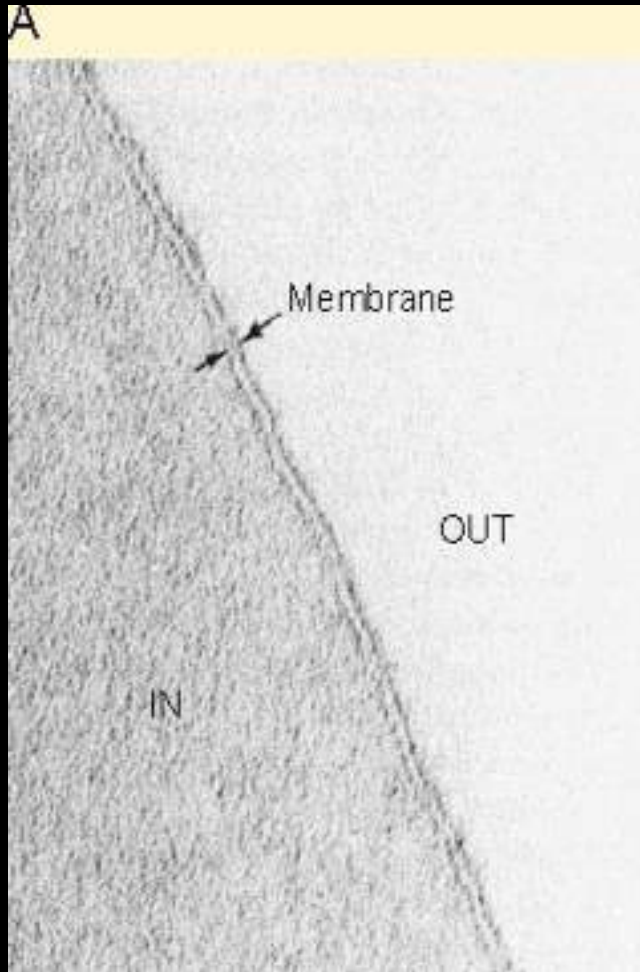


Chapitre II

La membrane plasmique

Pr. Boutaina BELQAT

I- Définition



- = **membrane biologique** très fine (75 Å de diamètre), de structure asymétrique, dont la fonction fondamentale :
- délimiter le milieu intracellulaire,
- le maintenir constant et,
- le séparer du milieu extracellulaire.

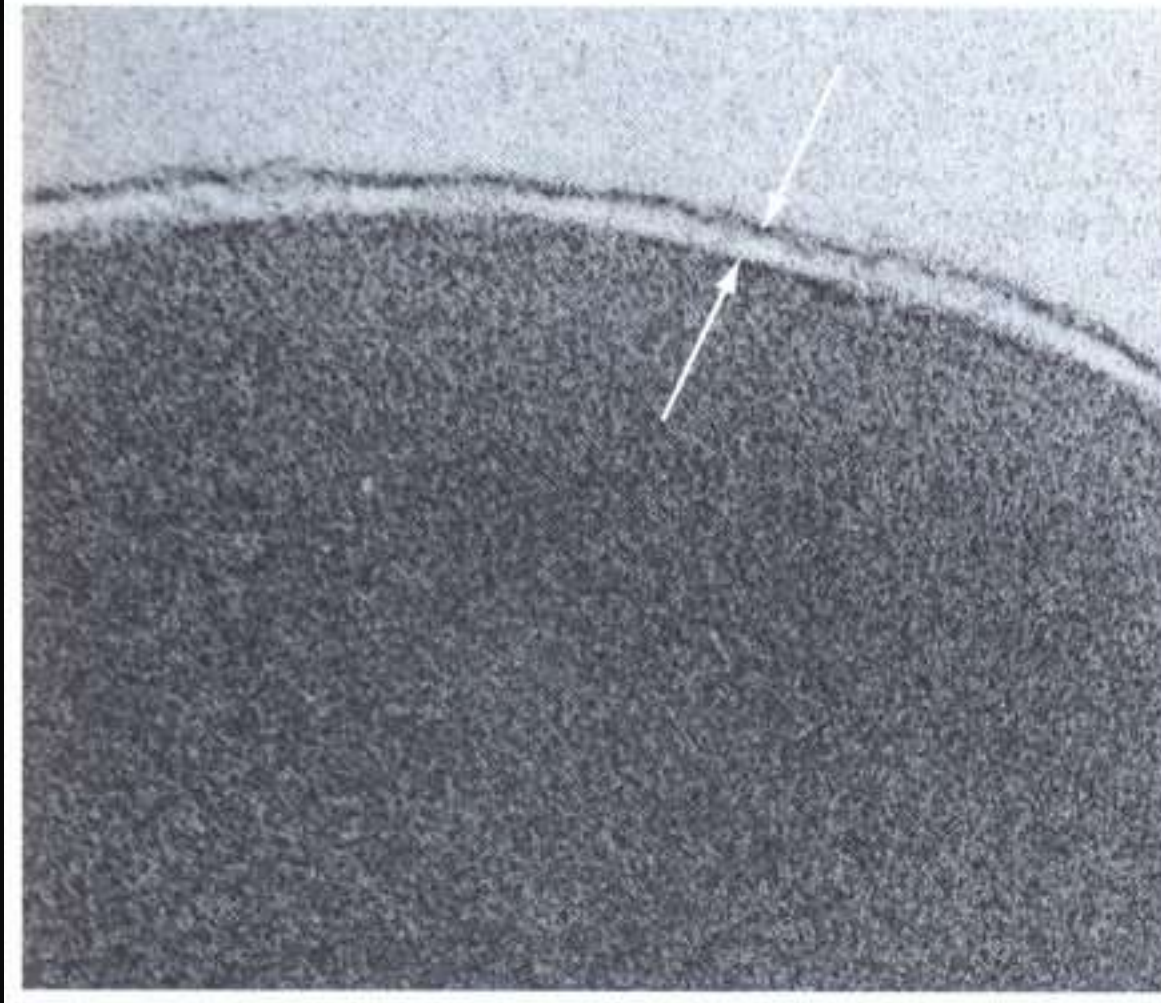


Figure 1. Aspect trilamellaire des membranes.
Micrographie électronique montrant la structure en trois assises

II– Isolement des membranes plasmiques et composition chimique

- L'isolement des membranes plasmiques par les techniques d'ultracentrifugation ne permet pas d'en étudier la composition biochimique avec précision à cause de la **présence de débris d'organites**.
- Les **hématies** sont utilisées, comme matériel d'étude, en raison de la simplicité de leur structure; ils sont **dépourvus de noyau** et d'**organites cytoplasmiques**.

II-1- Isolement des membranes des érythrocytes

Globules rouges humains qui sont le plus employés (collectés en grandes quantités par les banques du sang).

- Lavage des globules rouges dans une solution saline isotonique (NaCl 9‰, tamponné à pH 7,0 ou légèrement alcalin),

- Centrifugation

- Remise en suspension du culot de cellules ainsi obtenu dans un milieu hypotonique (solution tamponnée de NaCl à 5‰ ou moins).

II-1- Isolement des membranes des érythrocytes

- Les globules gonflent puis 15 secondes après le début de ce choc osmotique, de petits trous de 200 à 300 Å de diamètre se font dans la membrane plasmique.
- Dans ces conditions le hyaloplasme riche en hémoglobine sort des globules et se dilue dans le milieu hypotonique extracellulaire; les globules se vident ainsi de leur contenu. C'est le phénomène d'hémolyse.
- Après cette hémolyse les trous se referment et par centrifugation et lavages successifs on sédimente un culot de membranes plasmiques appelées **fantômes de globules rouges**



Équilibre



Entrée massive



Sortie massive

Isolement des membranes des érythrocytes



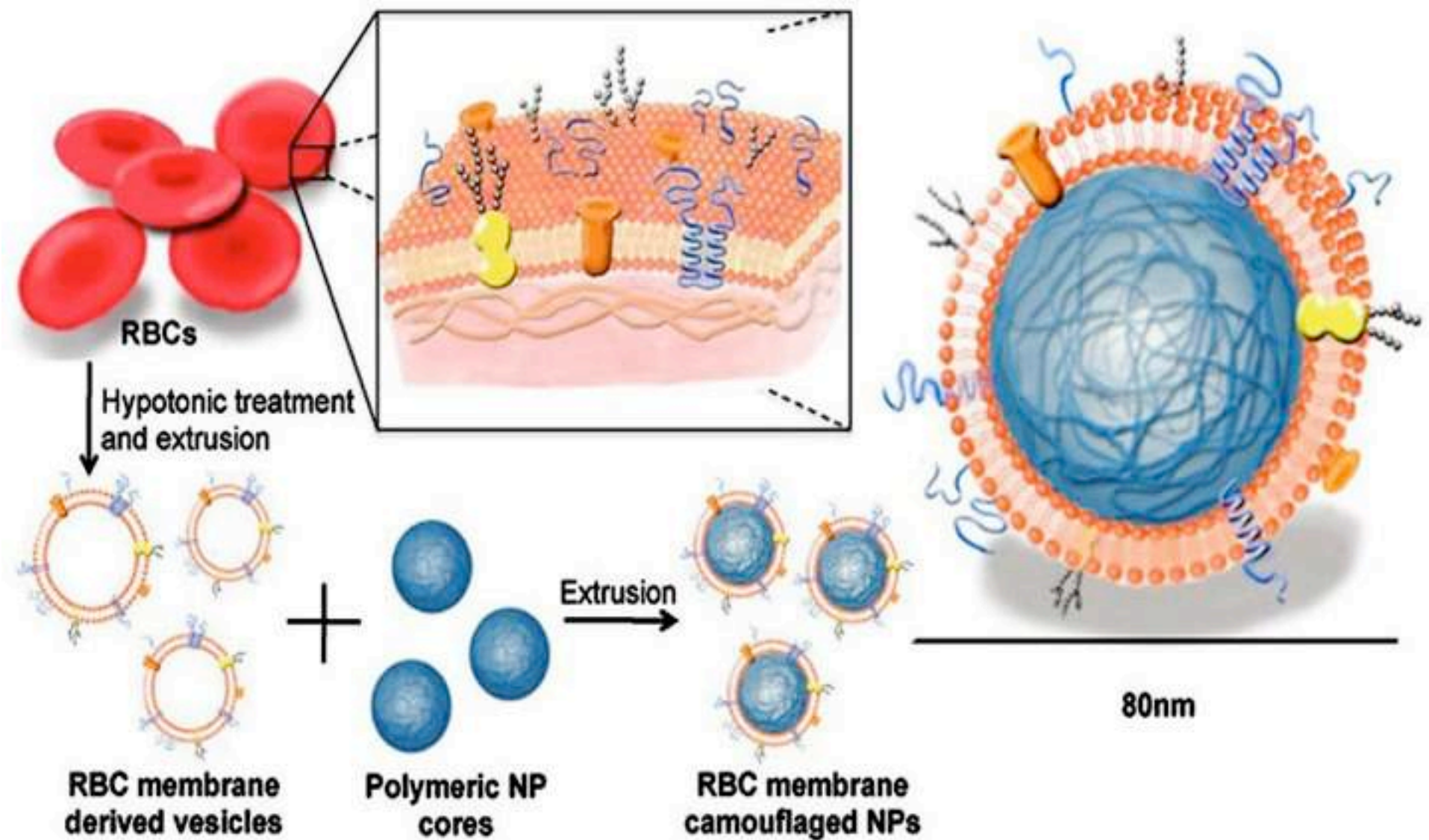
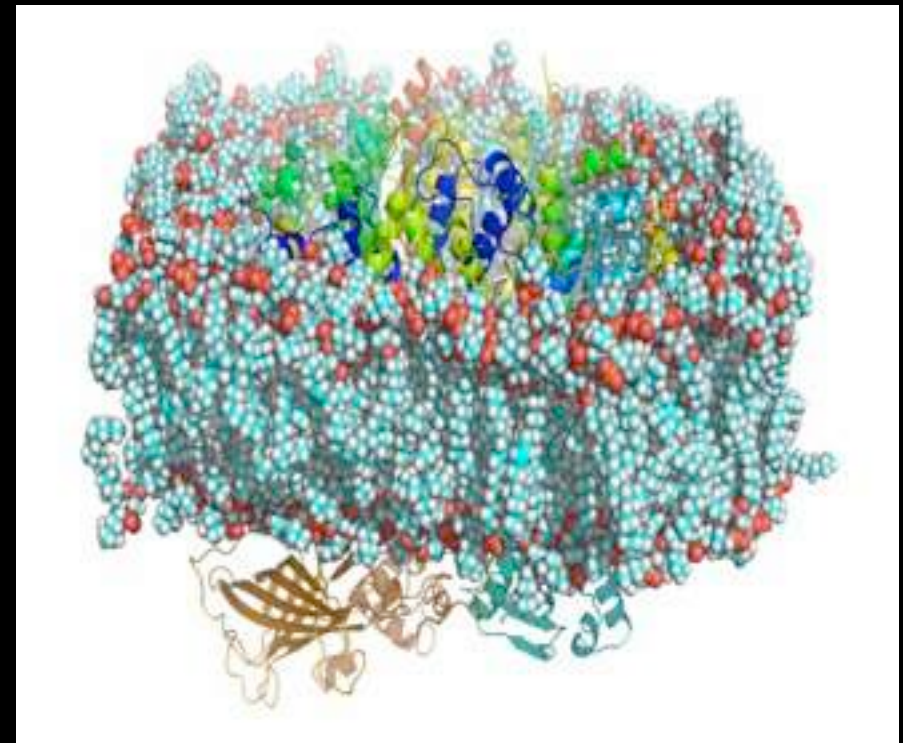
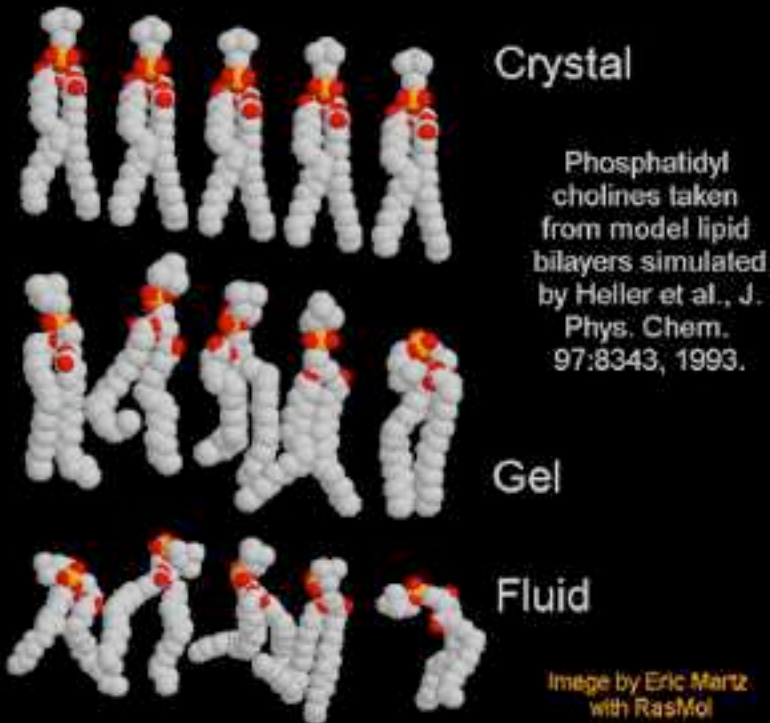


Figure 2. Isolement et observation de membranes plasmiques de globules rouges.

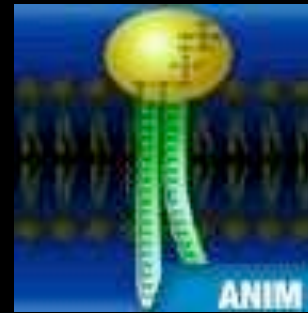
II-2- Analyse chimique des membranes plasmiques

- 40% de lipides
(phospholipides,
glycolipides...)

- 60% de protéines
(dont les glycoprotéines)

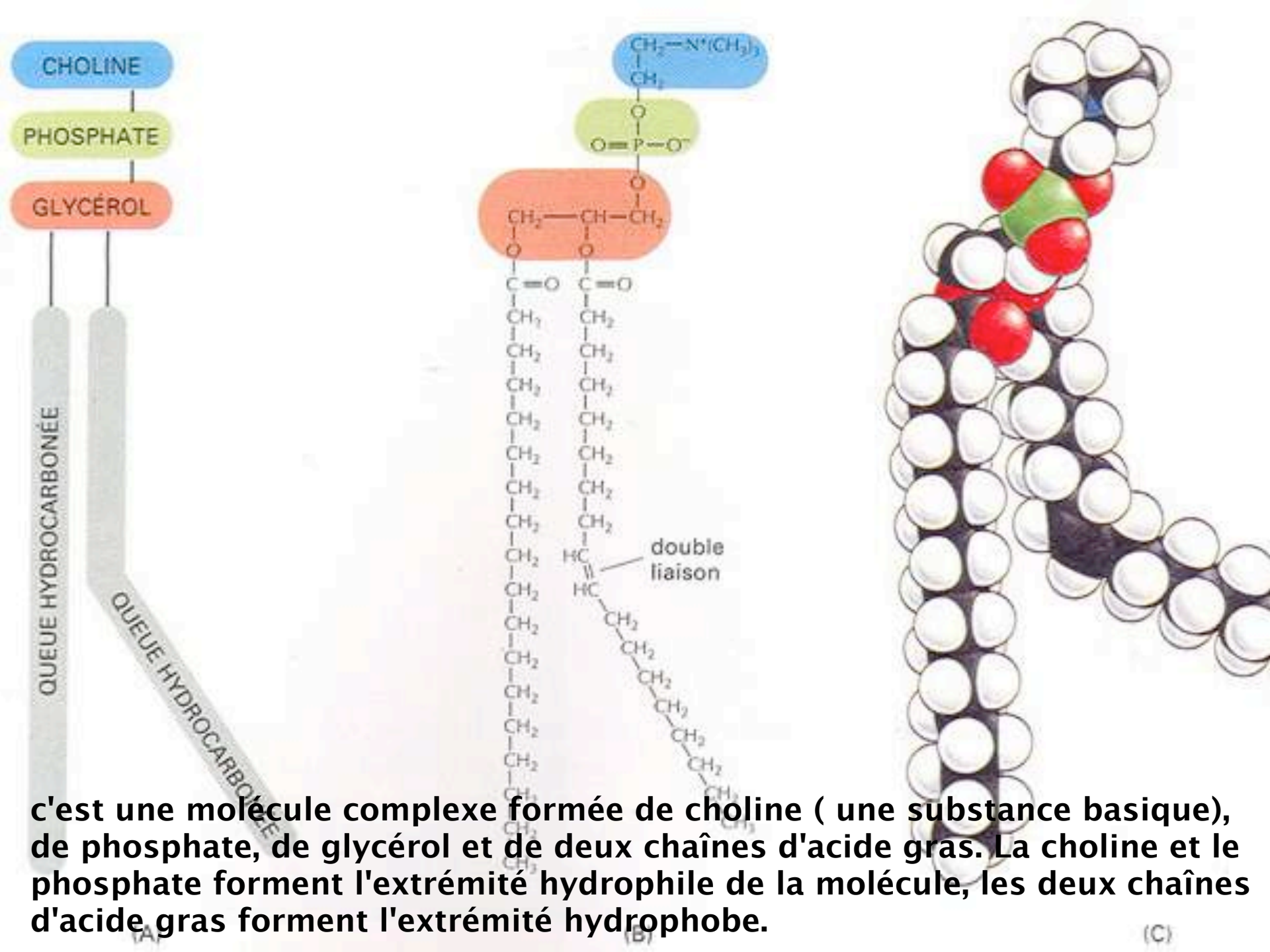


II-2-1- Les lipides



- Ce sont les constituants des corps gras (= combinaison d'alcools et d'acides gras).
- Les lipides membranaires sont **amphiphiles**:
 - un **pôle hydrophile** (extrémité soluble dans l'eau) et ,
 - un **pôle hydrophobe** (extrémité formée d'atomes de carbone et d'hydrogène, insoluble dans l'eau).

Les lipides sont essentiellement des lipides phosphorés ou **phospholipides** et du cholestérol en proportions variables suivant les types cellulaires et les espèces étudiées.



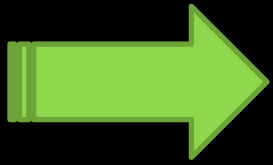
c'est une molécule complexe formée de choline (une substance basique), de phosphate, de glycérol et de deux chaînes d'acide gras. La choline et le phosphate forment l'extrémité hydrophile de la molécule, les deux chaînes d'acide gras forment l'extrémité hydrophobe.

II-2-2- Les protéines membranaires

- Importantes par leur taille (30 à 50 fois plus volumineuses que les lipides; PM compris généralement entre 20000 et 215000),
- elles représentent 50% de la masse de la membrane.
- Elles n'ont pas de pôle, mais deux **extrémités hydrophiles**.
- Tout au long de la protéine alternent des zones hydrophiles et hydrophobes en fonction de la nature des acides aminés qui les constituent.

III- Organisation moléculaire

- E. Corter et F. Grendel supposèrent que les membranes cellulaires étaient composées d'une **double couche de molécules lipidiques**.
- Ils firent éclater des globules rouges et séparèrent l'hémoglobine des membranes.
- Puis ils effectuèrent une dissolution des lipides membranaires dans l'acétone.
- Quand on mélangeait cette préparation avec de l'eau, les lipides remontaient à la surface et s'étaient en une pellicule d'une seule épaisseur de molécules.
- La surface de cette monocouche lipidique correspondait au double de la surface des membranes plasmiques des globules rouges utilisés.



les lipides de la membrane plasmique forment une couche bimoléculaire.

Surface = S

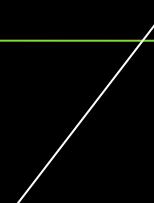


Membrane plasmique:
double couche de
molécules lipidiques.

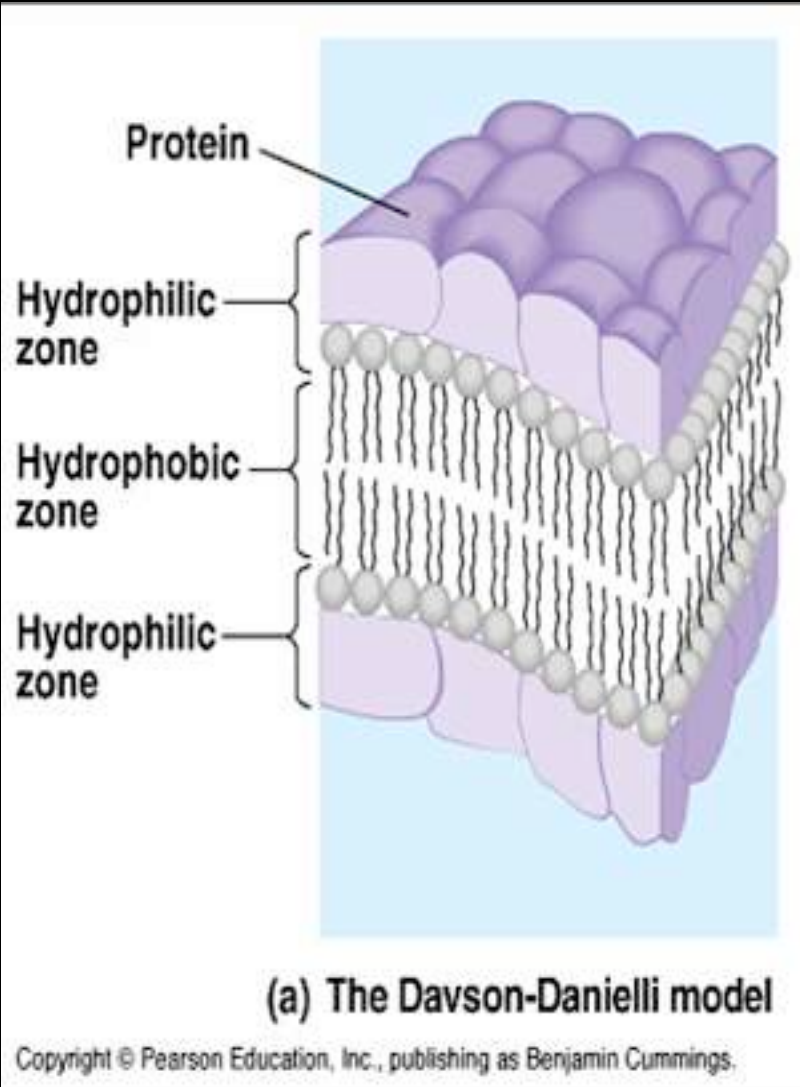
Surface = 2S



acétone



Modèle de Davson et Danielli (1935)



- Les membranes cellulaires seraient composées :
 - d'une double couche de lipides encadrée,
 - par deux couches de protéines.

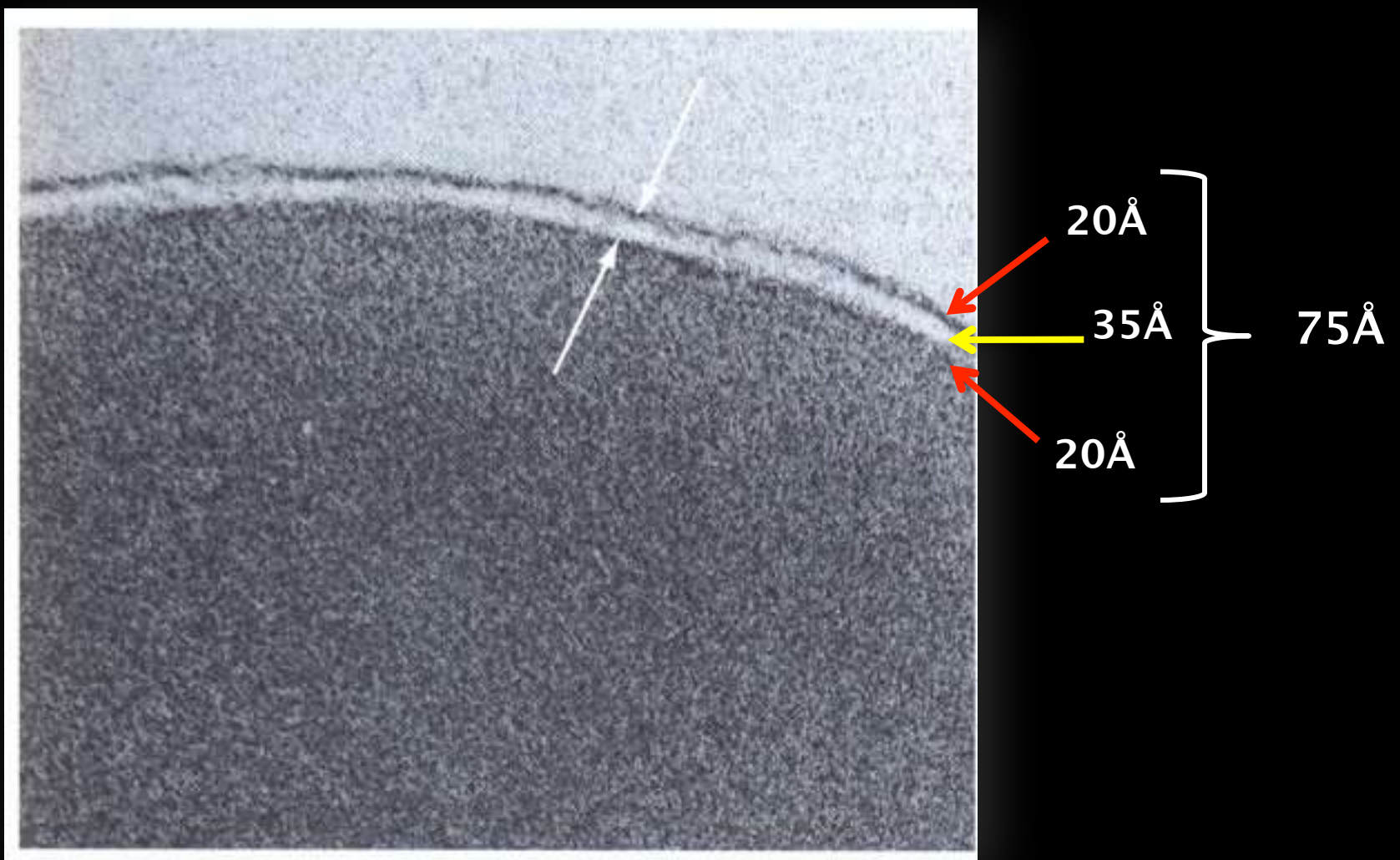
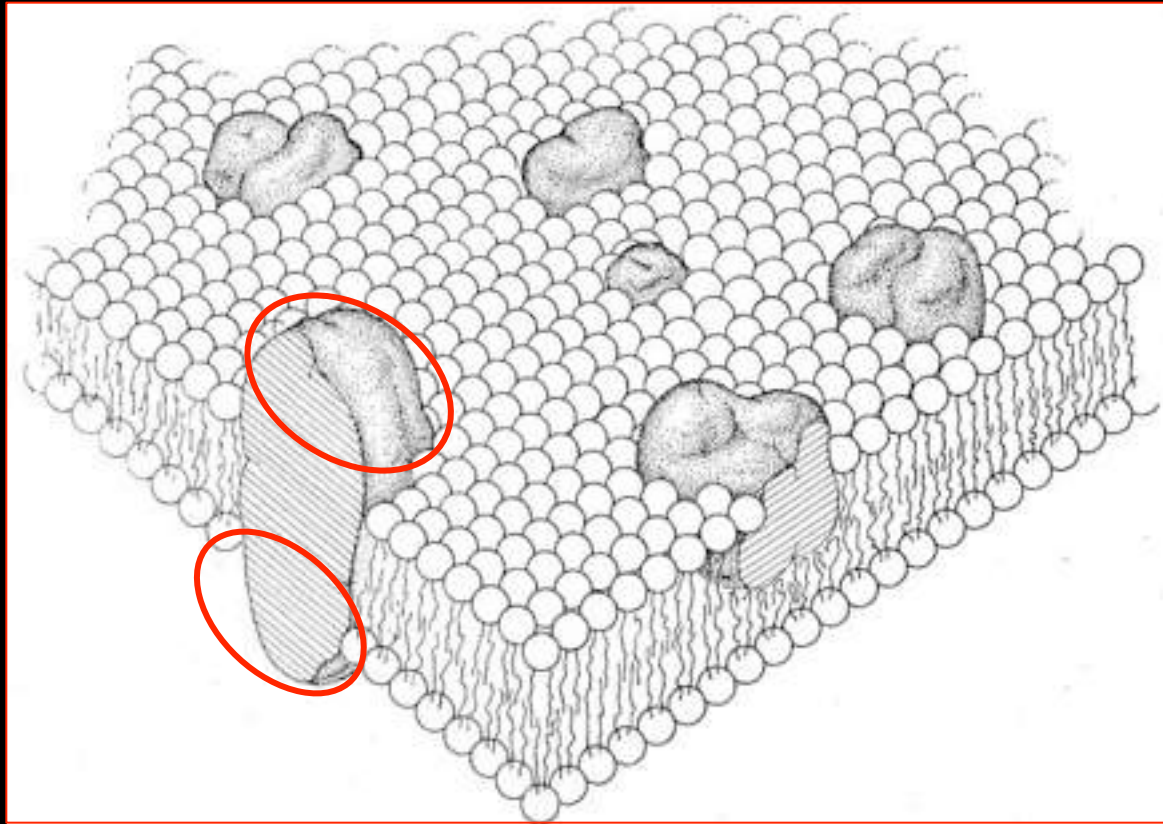


Figure. Structure trilamellaire des membranes (trois feuillets: deux feuillets sombres de 20Å de part et d'autre d'un feuillet clair de 35Å).

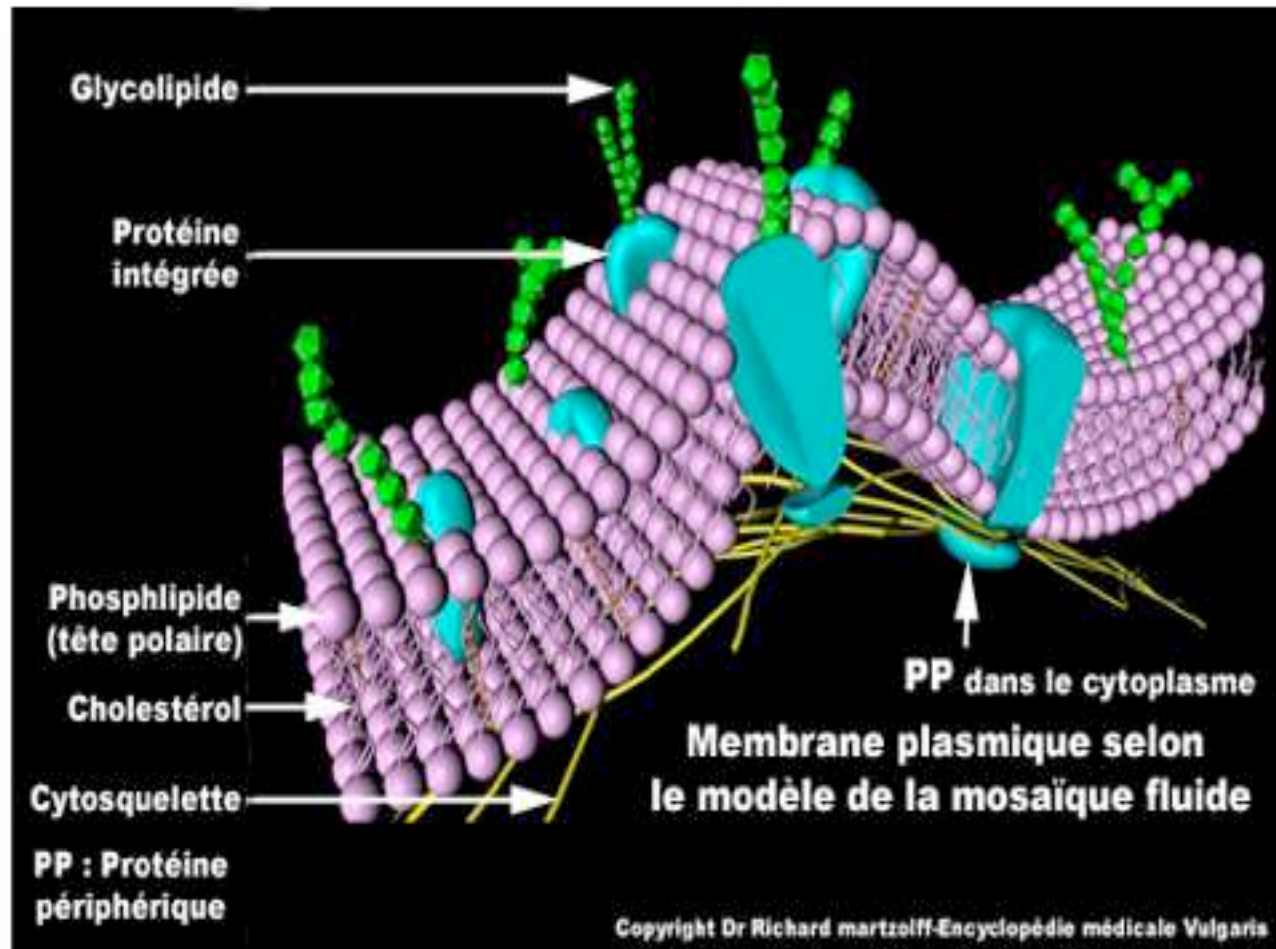
(Microscope électronique, grossissement X 150000)

S.J. Singer et G. Nicolson (1972)

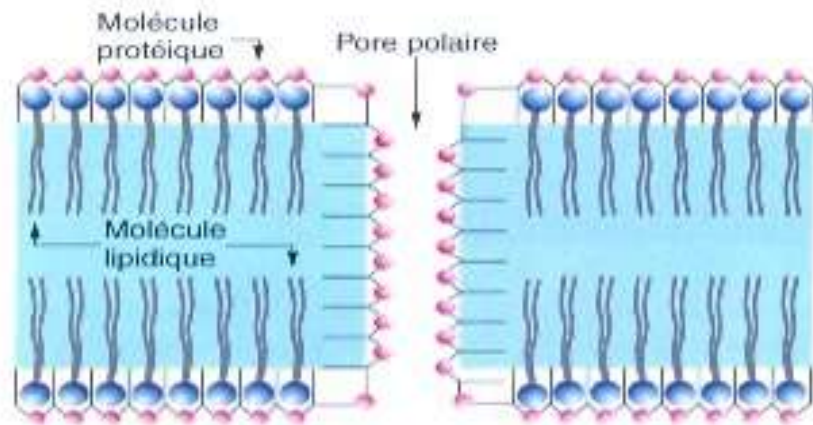


Les protéines membranaires sont **dispersées** et **individuellement insérées** dans la **bicouche lipidique** et seules leurs **parties hydrophiles** émergent suffisamment pour entrer en contact avec l'eau.

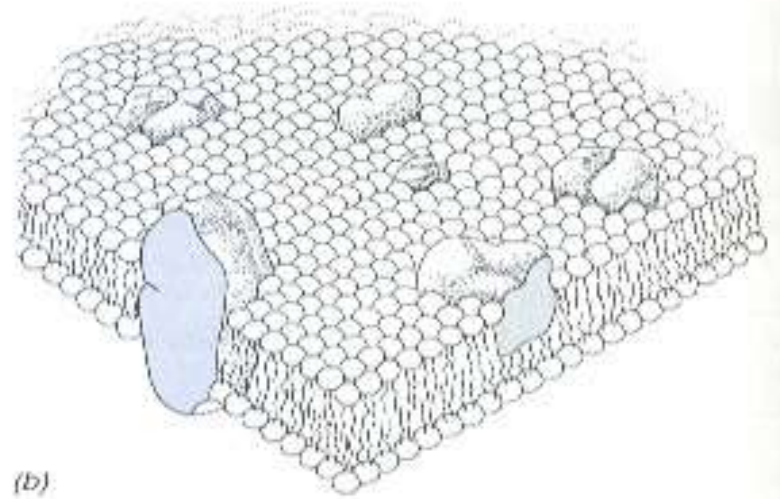
Modèle de la mosaïque fluide (membrane = une mosaïque constituée d'une double couche fluide de phosphoglycérolipides dans laquelle flottent des molécules protéiques)



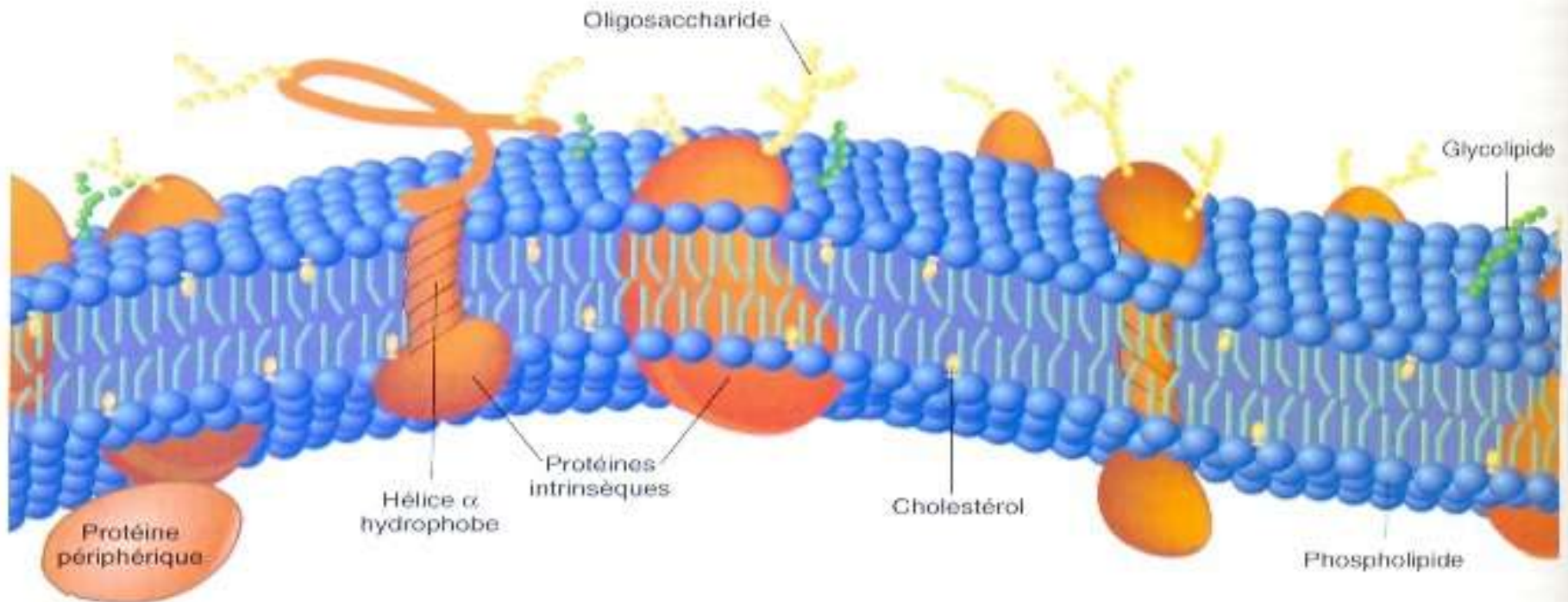
Modèle de la mosaïque fluide



(a)



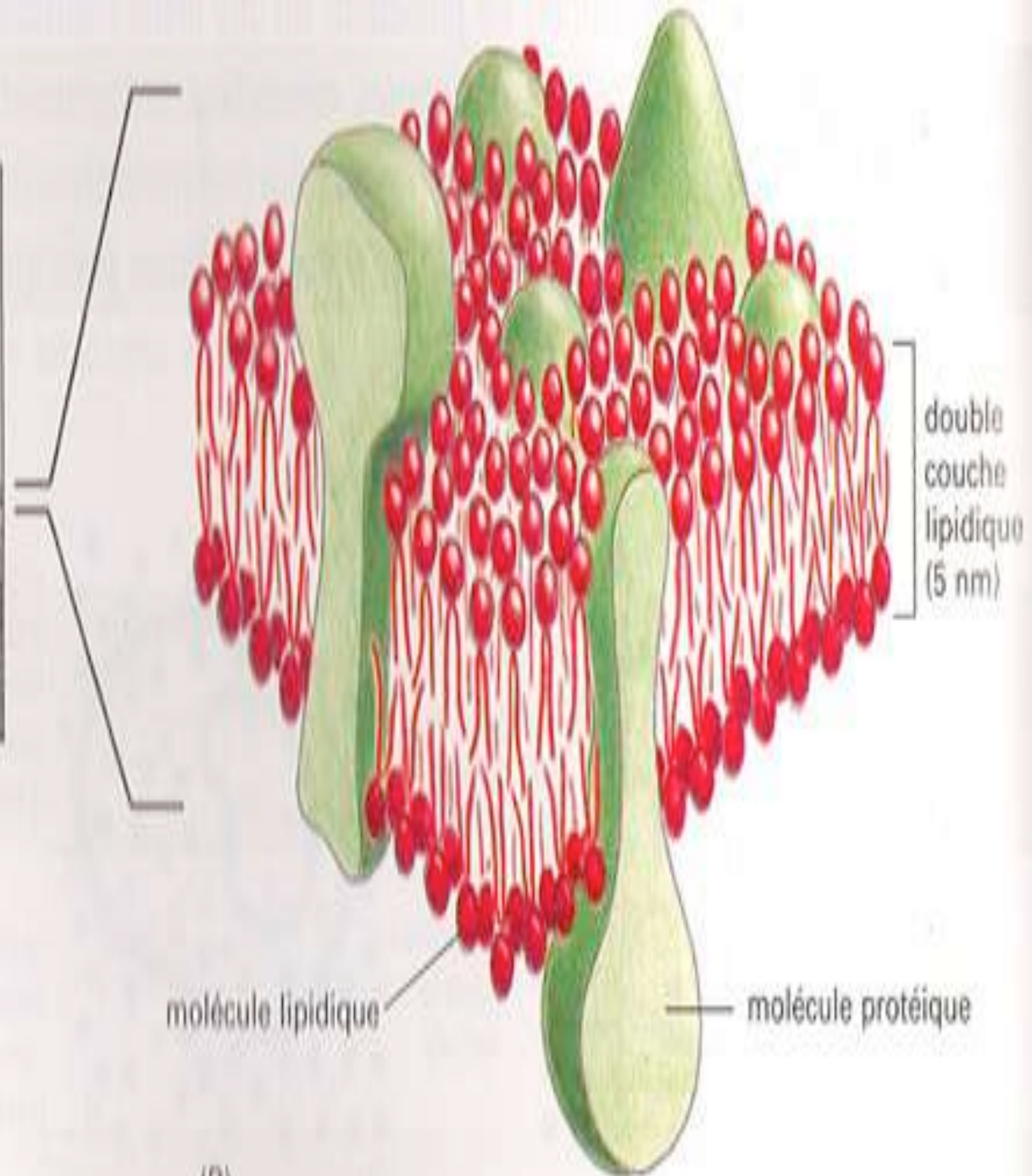
(b)



(c)



(A)



(B)

V- Régulation des échanges entre la cellule et le milieu externe

- La membrane plasmique agit à la manière d'une **barrière semi-perméable** entre le compartiment cellulaire et l'environnement extracellulaire.
- Sa perméabilité doit être suffisamment sélective pour permettre:
 - l'entrée des molécules essentielles (glucose, acides aminés...),
 - le rejet des déchets du métabolisme,
 - le transit, dans les deux sens, d'ions spécifiques assurant les concentrations ioniques intracellulaires qui diffèrent fortement de la composition ionique des liquides extracellulaires.
- Les échanges entre la cellule et son environnement se font:
 - soit par **perméabilité** à travers la membrane pour les **petites molécules** = **perméabilité membranaire** ou **transport transmembranaire**,
 - soit par **voie vésiculaire** pour les grosses

V-1- Perméabilité transmembranaire

Toutes les substances ne traversent pas la barrière membranaire sans restrictions:

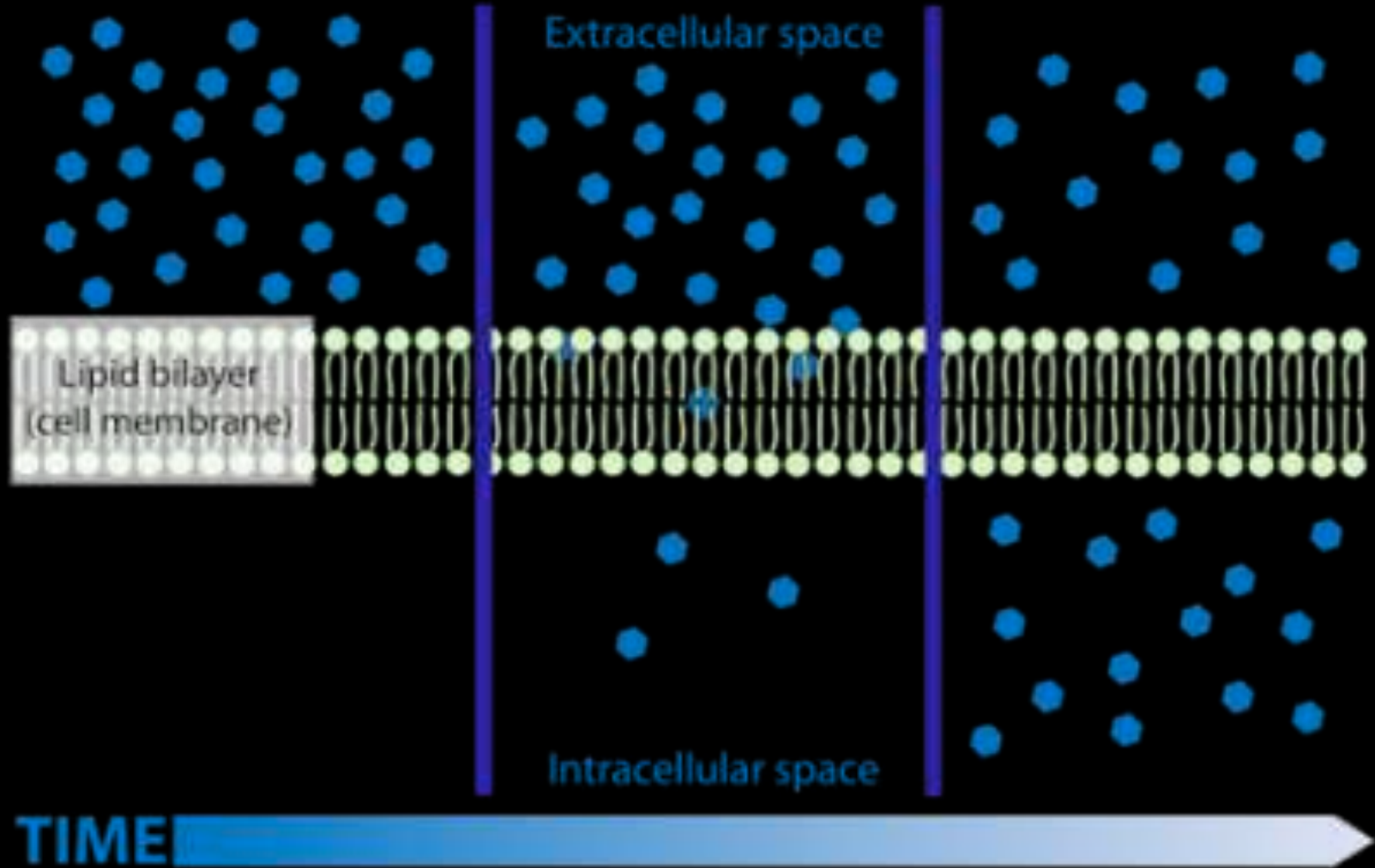
- La cellule a la capacité d'admettre de nombreuses variétés de petites molécules et de refuser son accès à d'autres.
- Toutes les substances ne traversent pas la membrane à la même vitesse.

V-1- Perméabilité transmembranaire

V-1-1- Participation des

- Le caractère hydrophobe de la partie interne de la phase lipidique bimoléculaire fait d'elle une barrière **imperméable** à la plupart des molécules polaires (hydrophiles).
- Les études expérimentales effectuées sur des membranes artificielles constituées d'une couche bimoléculaire de phospholipides ont montré que :
 - ☀️ Toute molécule diffuse à travers la membrane si le temps lui est donné,
 - ☀️ **La vitesse de diffusion** varie en fonction de la taille des molécules et de leur solubilité dans l'huile (les molécules hydrophobes, comme les hydrocarbures et l'oxygène, se dissolvent dans la membrane et la traversent aisément.
 - ☀️ De deux molécules également solubles dans les lipides, c'est la plus petite des deux qui traversera la

Toute molécule diffuse à travers la membrane si le temps lui est donné

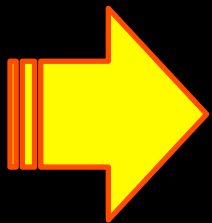


V-1- Perméabilité transmembranaire

V-1-1- Participation des lipides



Le gradient obéit aux lois du **gradient des concentrations** (tendance à l'équilibre des concentrations de part et d'autre de la membrane).

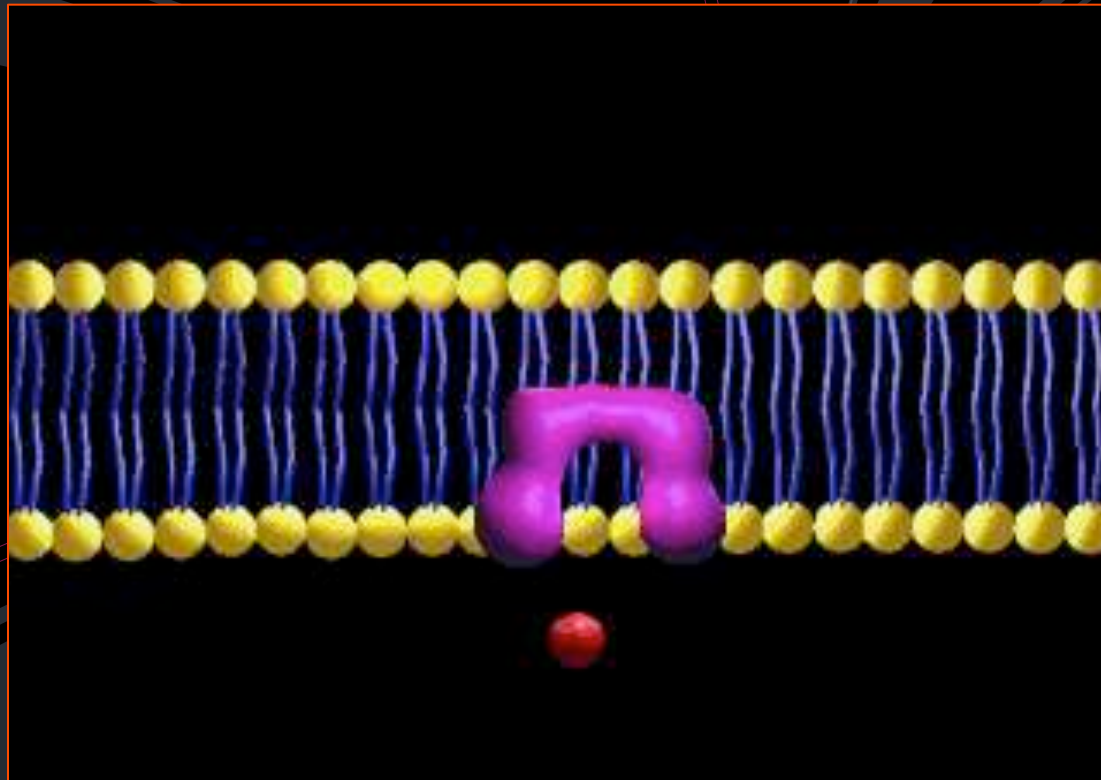


H₂O, petite molécule non chargée, et les petites molécules hydrophobes d'un PM faible pénètrent dans la cellule par **simple diffusion physique**, les molécules en solution migrant **des zones de forte concentration vers celles de faible concentration.**

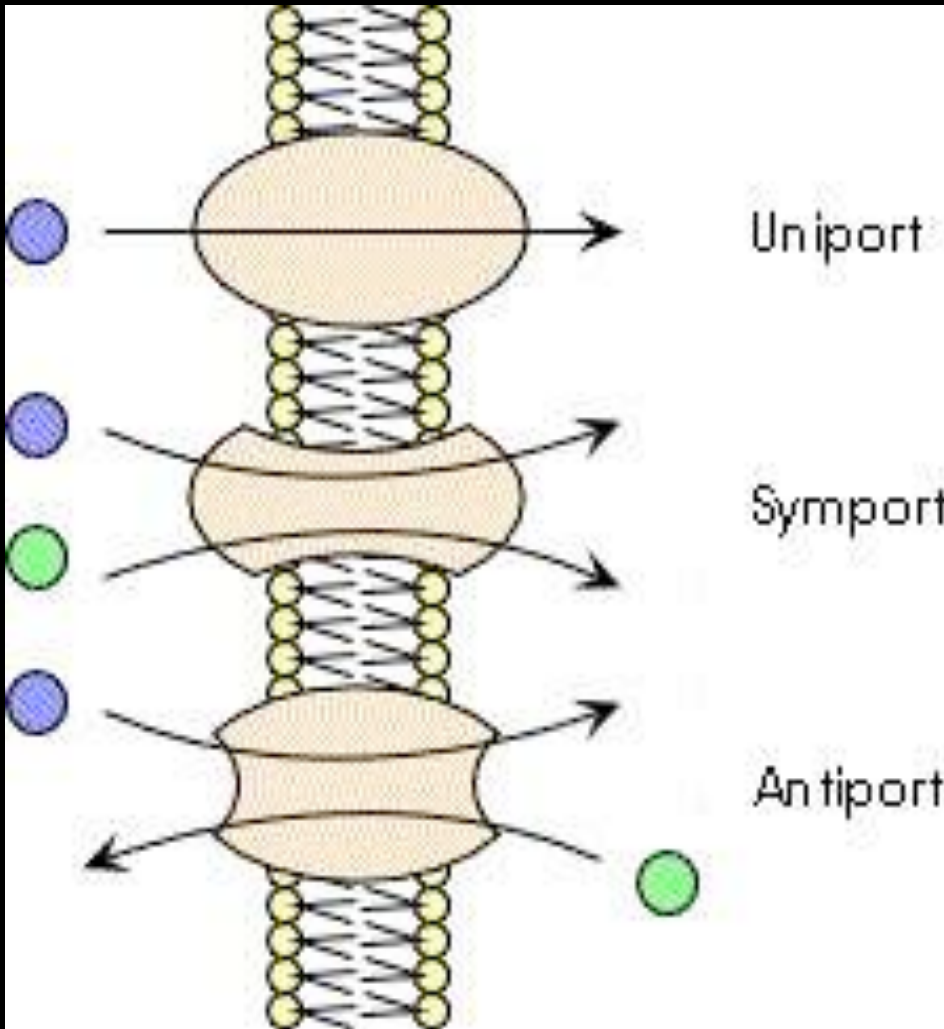
V-1- Perméabilité transmembranaire

V-1-2- Participation des protéines

Le transport des **petites molécules non liposolubles** se fait grâce à des **protéines transmembranaires spécialisées**, chacune étant responsable du transfert d'un type de molécules ou d'un groupe de molécules étroitement apparentées.



Les protéines de transport appartiennent à l'une des catégories suivantes:



- Les protéines de type **uniport**
(une seule molécule ou un seul ion dans un sens ou dans l'autre)
- Les protéines de type **symport**
(deux substances de nature différente dans la même direction)
- Les protéines de type **antiport**
(deux substances de nature différente dans la même

V-1-3- Déplacement des substances à travers les membranes cellulaires

Fondamentalement ce déplacement peut emprunter deux voies :

- Une **voie passive**, par **diffusion**, si la molécule transportée n'est pas chargée ; dans ce cas, seul le **gradient de concentration** détermine la direction du transport qui est dit **transport passif**, et

- une **voie active**, par un mécanisme de transport nécessitant de l'énergie, si le soluté porte une charge nette (cas des ions) ; son transport est alors influencé par le **gradient de concentration** mais aussi par le **gradient électrique** à travers la membrane (potentiel de membrane) ; dans ce cas, le transport est dit **transport actif**.

TRANSPORT PASSIF

TRANSPORT ACTIF

Diffusion simple

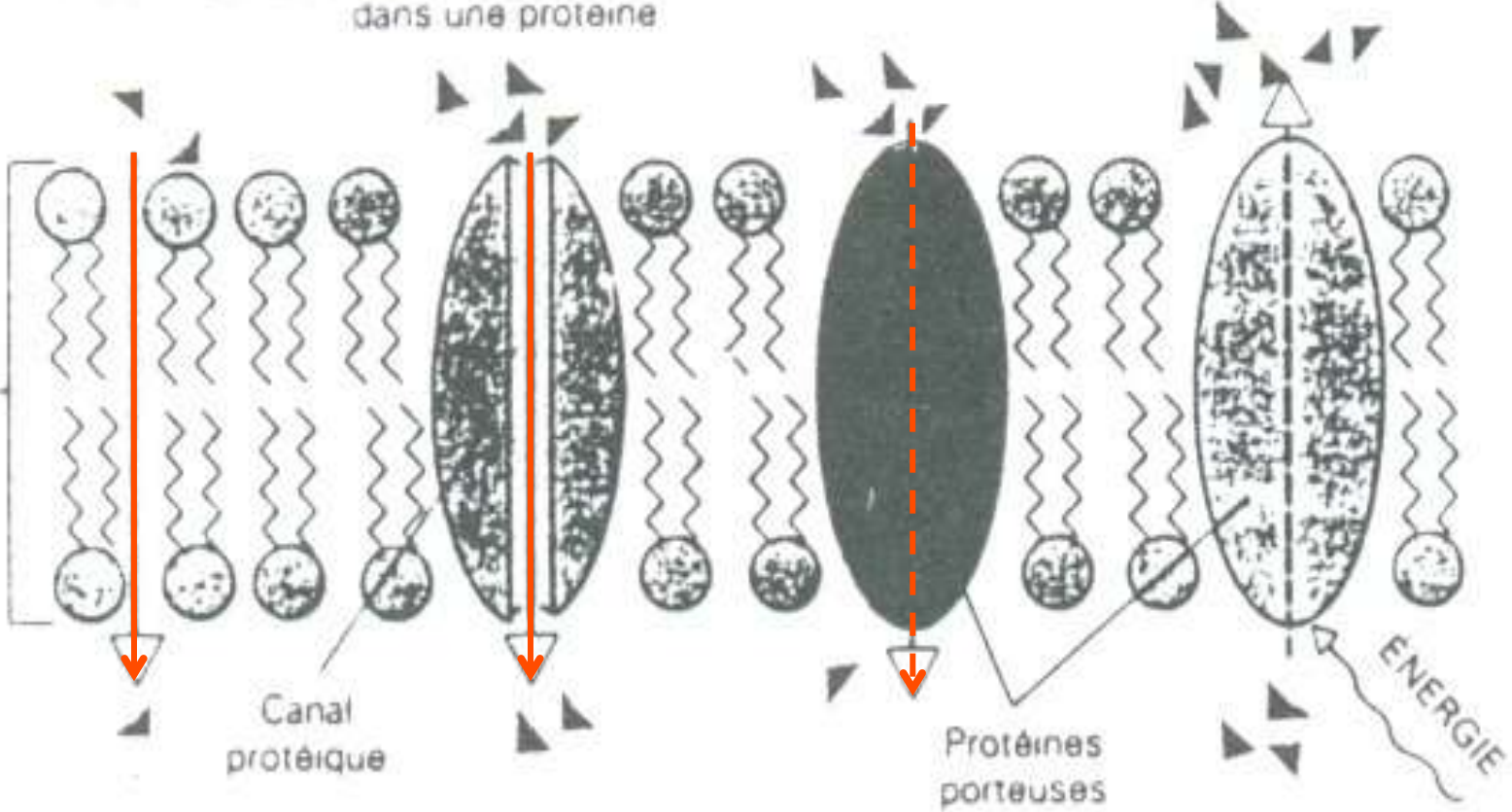
Diffusion facilitée

A travers la bicouche lipidique A travers un canal aqueux dans une protéine

Liaison avec un transporteur

Dépense d'énergie et liaison avec un transporteur

MEMBRANE

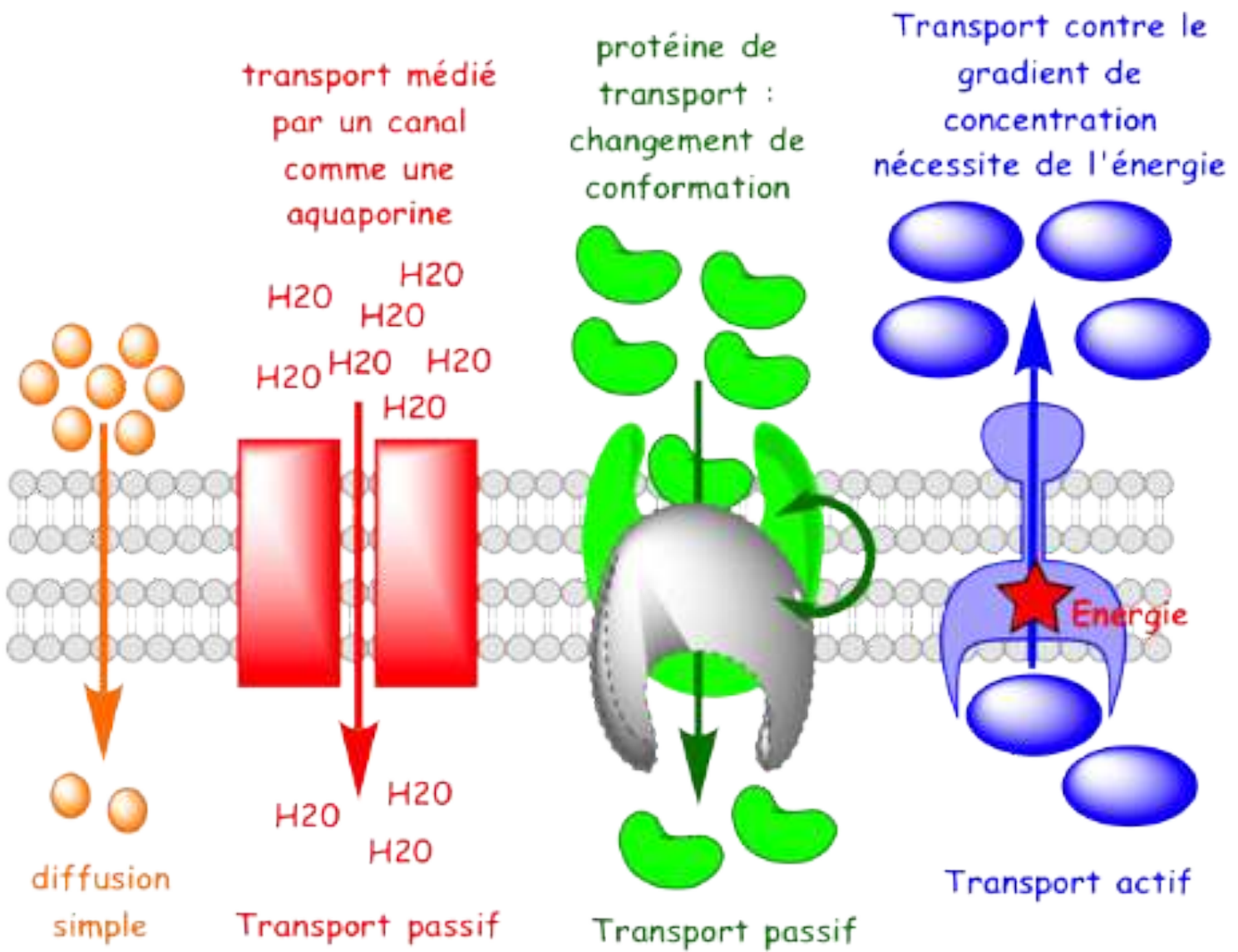


Concentration élevée

Extérieur

Intérieur

Concentration faible



transport médié
par un canal
comme une
aquaporine

protéine de
transport :
changement de
conformation

Transport contre le
gradient de
concentration
nécessite de l'énergie

diffusion
simple

Transport passif

Transport passif

Transport actif

V-1-4- Diffusion de l'eau à travers les membranes

L'osmose

- L'**osmose** est un phénomène physique passif qui se produit seulement si les solutions sont séparées par une **membrane semi-perméable**. Elle est influencée par des solutés qui sont trop gros pour traverser la membrane.
- Seul le **solvant** (eau) peut alors **traverser** la membrane du côté **hypotonique** (le moins concentré) vers le côté **hypertonique** (le plus concentré) jusqu'à ce que les solutions soient **isotoniques** (de même concentration).

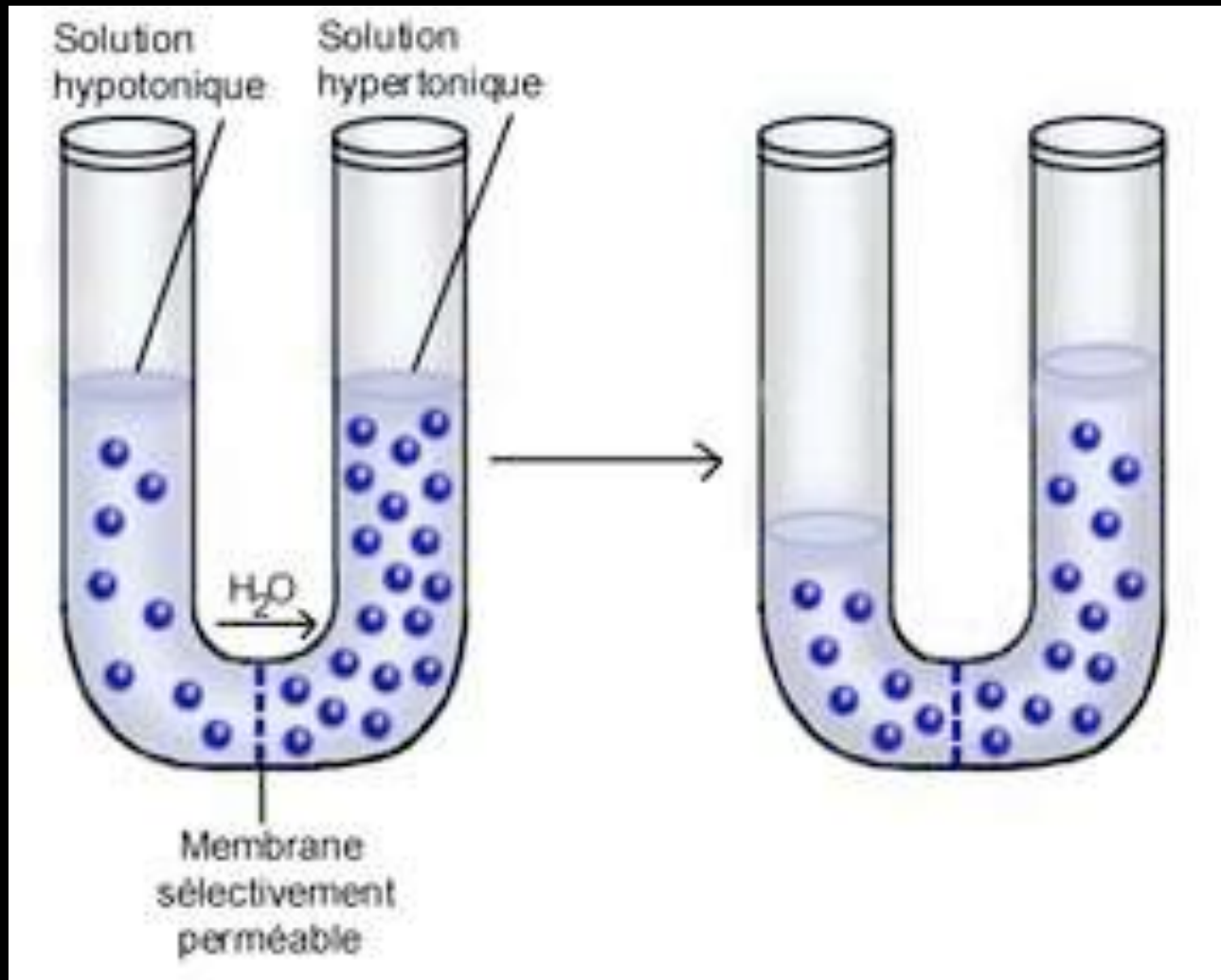
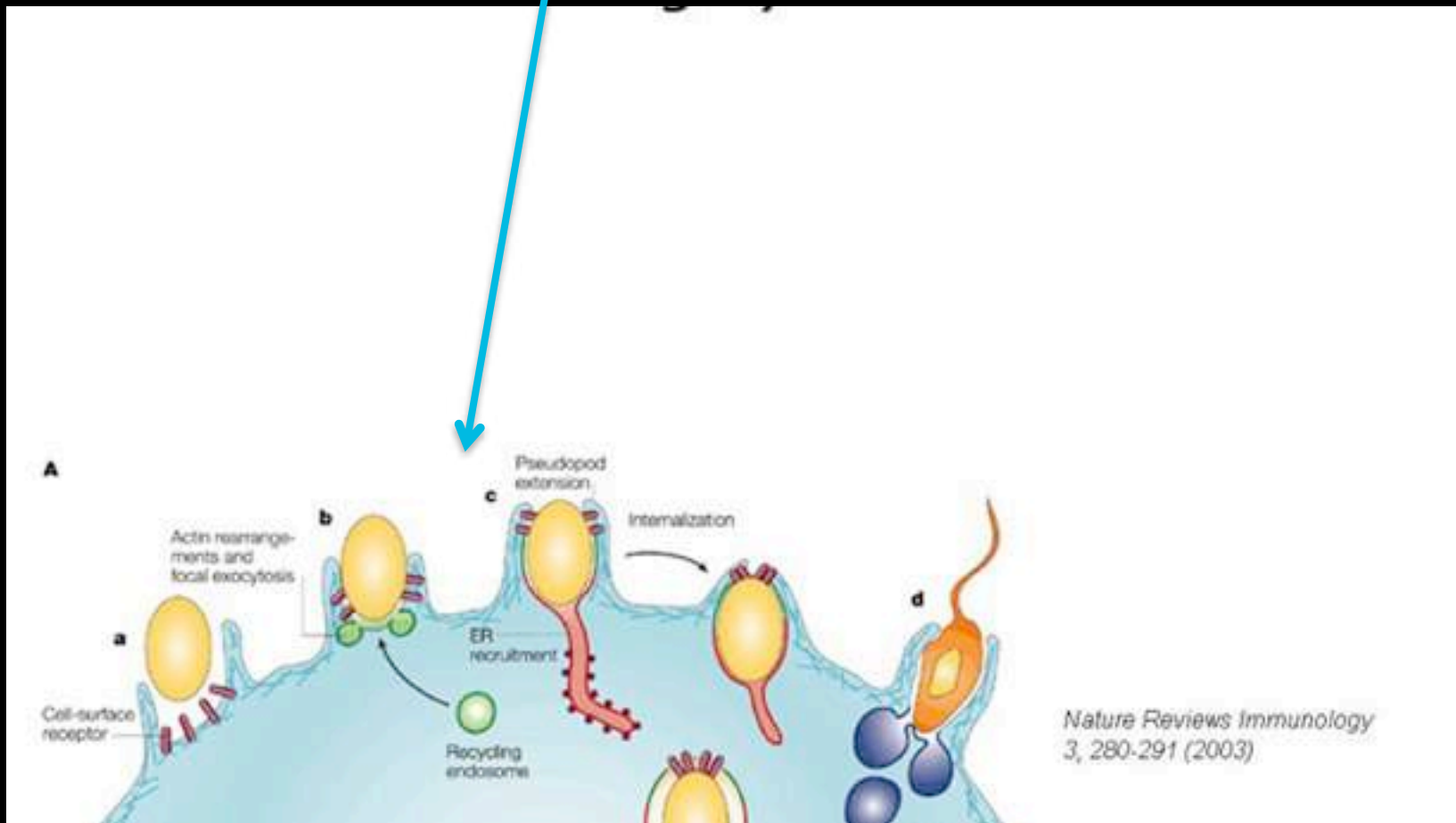
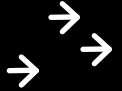


Figure 14. Osmose. Deux solutions de glucose de concentrations différentes sont séparées par une membrane perméable au solvant mais imperméable au soluté. La forme en U du récipient facilite l'observation des changements de volume.

VI-2- Transport par voie vésiculaire

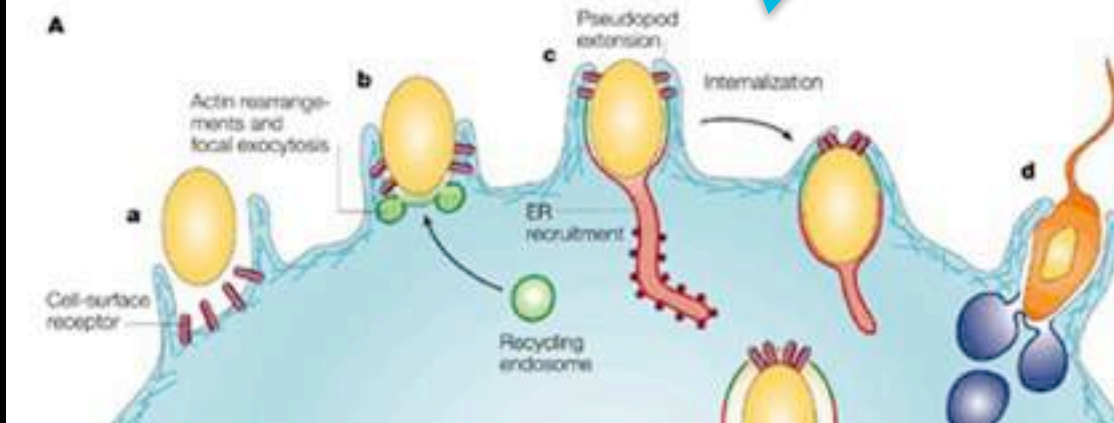
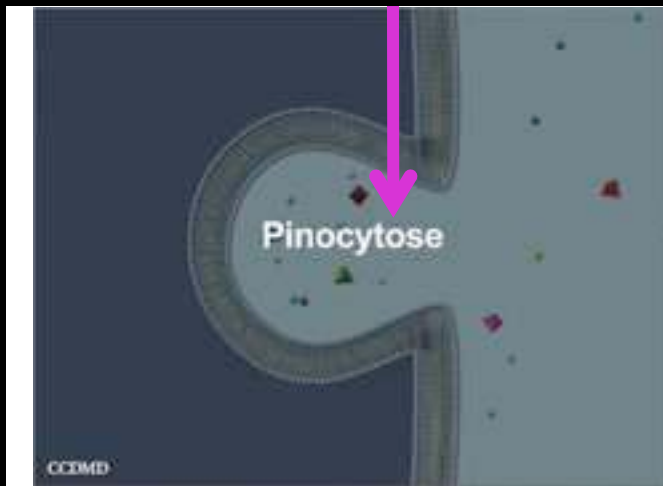
La pénétration de gros matériaux extracellulaires par des vésicules cytoplasmiques peut s'effectuer de deux façons distinctes, la **phagocytose** et l'**endocytose***



VI-2- Transport par voie vésiculaire

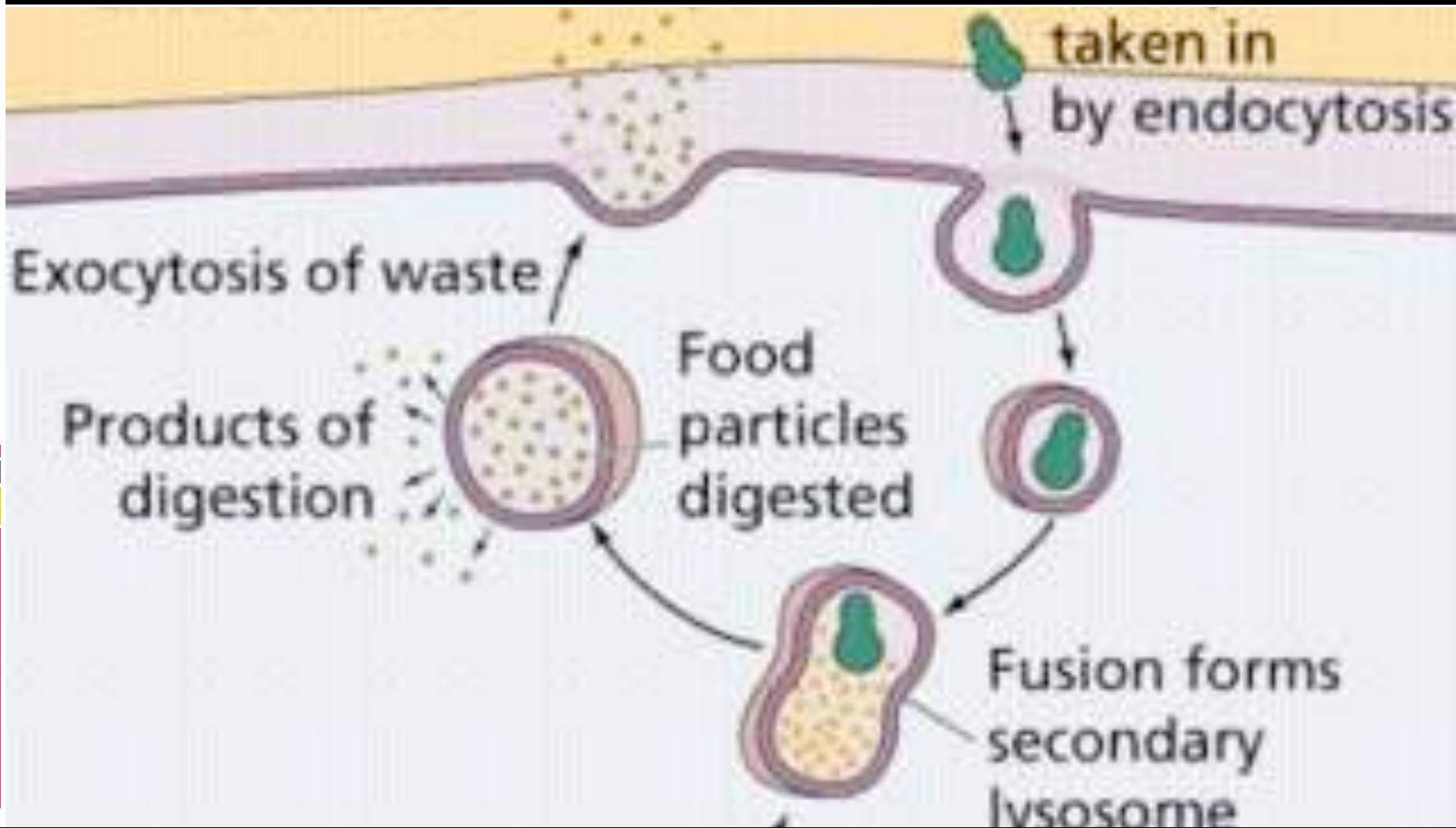
La pénétration de gros matériaux extracellulaires par des vésicules cytoplasmiques peut s'effectuer de deux façons distinctes, **la phagocytose** et l'endocytose

(pinocytose)*



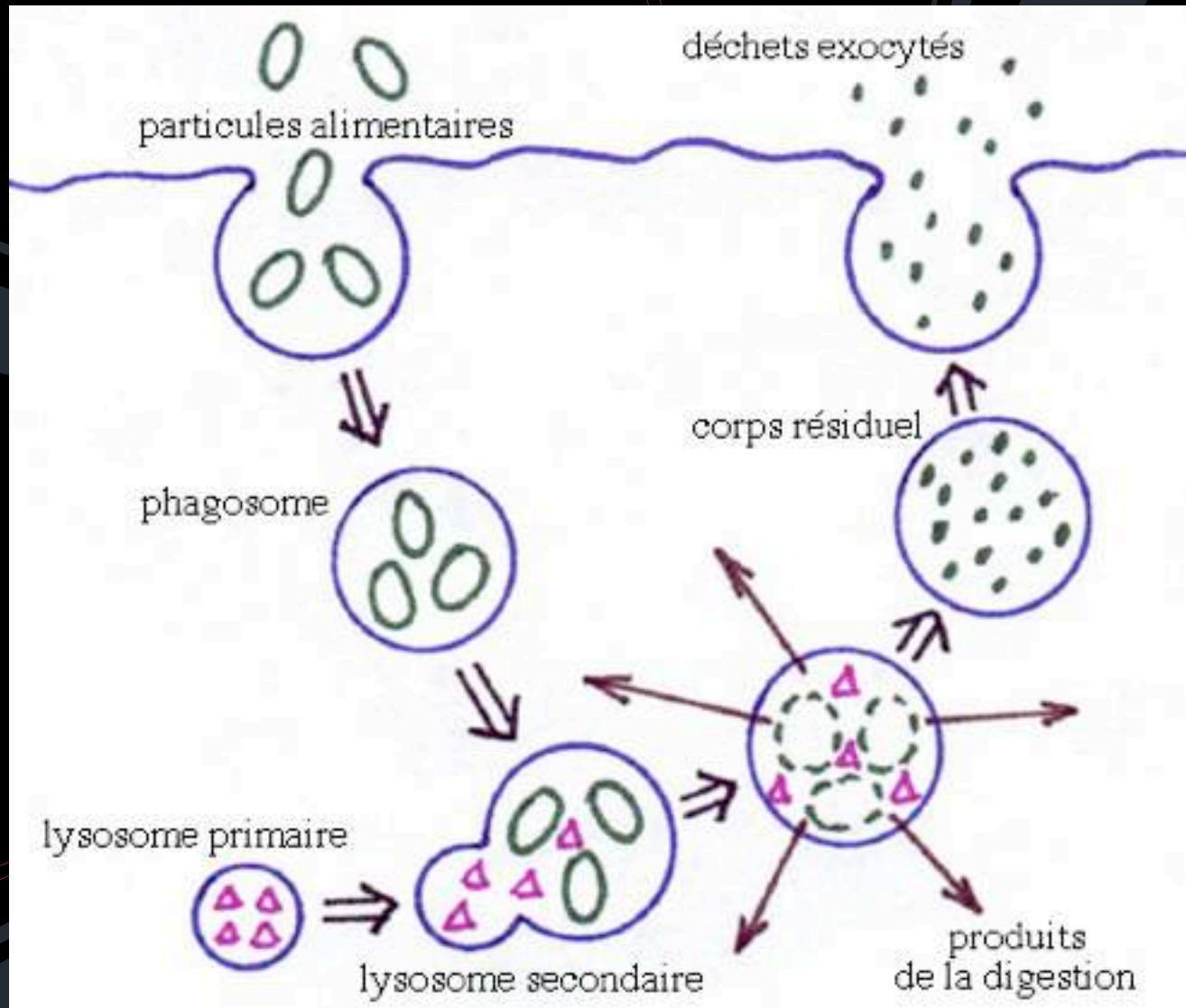
Nature Reviews Immunology
3, 280-291 (2003)

* : La terminologie a subi un remaniement au cours des dernières années. En 1963, Christian de Duve introduisait le terme **endocytose**, terme général qui regroupait les deux types d'activités, l'ingestion de particules solides (phagocyte) ou la pénétration de liquides et solutés (pinocytose). Actuellement, le terme pinocytose est devenu inhabituel, et le terme « endocytose » est devenu d'usage commun pour **décrire la prise du liquide et des molécules dissoutes ou en suspension** et elle se distingue de la phagocytose. → →



VI-2-1-1- La phagocytose

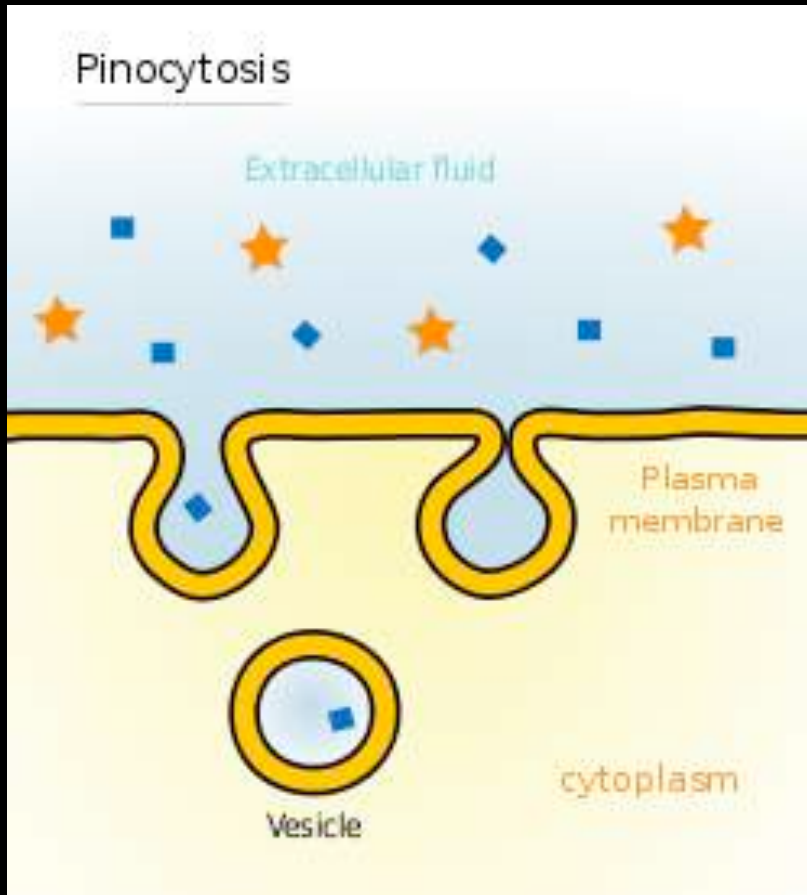
Elle correspond à l'ingestion de **grosses particules solides** dont la taille peut atteindre plusieurs micromètres.



VI-2-1-2- L'endocytose

- Correspond au prélèvement d'une **gouttelette** (diamètre < 0.1 microns) d'un **liquide extracellulaire** contenant ou non des petites molécules.
- On peut diviser grossièrement l'endocytose en deux catégories :
 - **l'endocytose en vrac** et,
 - **l'endocytose par récepteur interposé**. L'**endocytose par récepteur interposé (ERI)** aboutit à la capture de molécules extracellulaires spécifiques (ligands) après leur liaison à des récepteurs de la surface externe de la membrane plasmique.

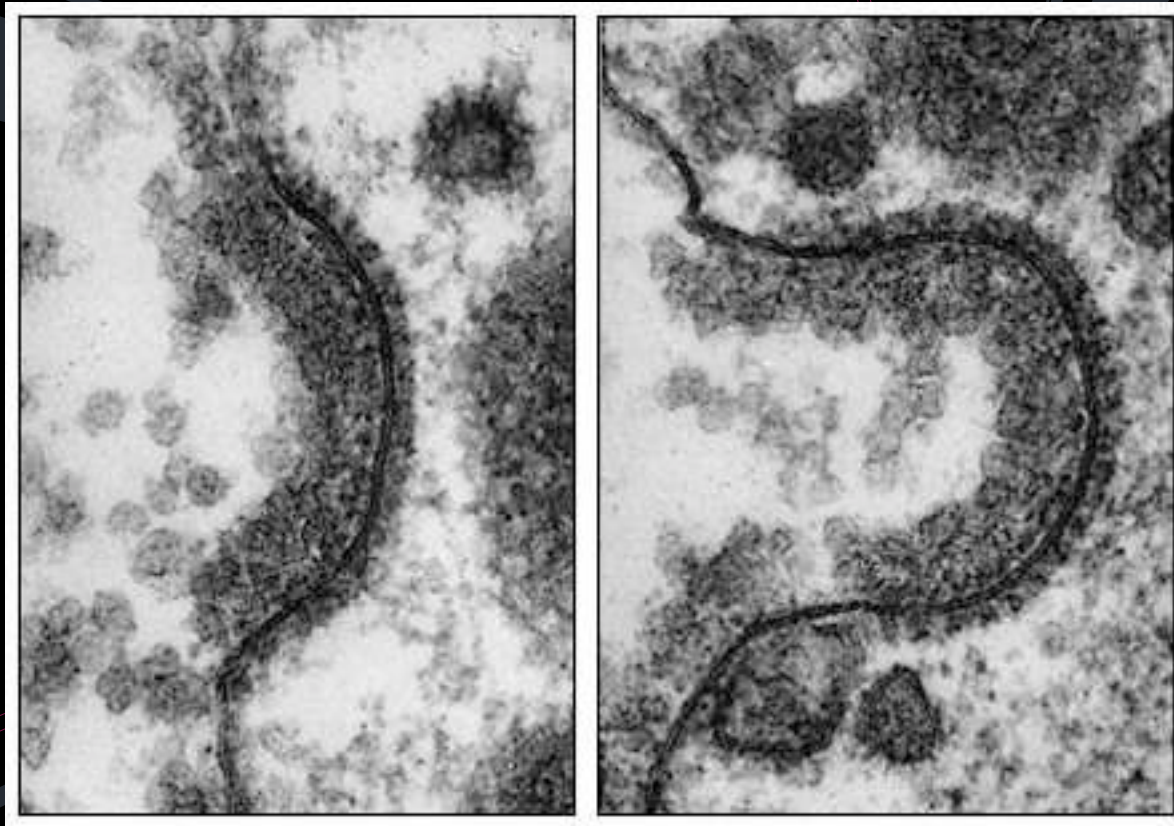
Endocytose en vrac =



capture non spécifique de liquides extracellulaires sans aucune reconnaissance par la surface membranaire.

Endocytose par récepteur interposé =

processus hautement spécifique grâce à des récepteurs, protéines transmembranaires amphiphiles, groupées en des régions déterminées de la membrane, qui reconnaissent sélectivement une substance donnée.



Clathrine

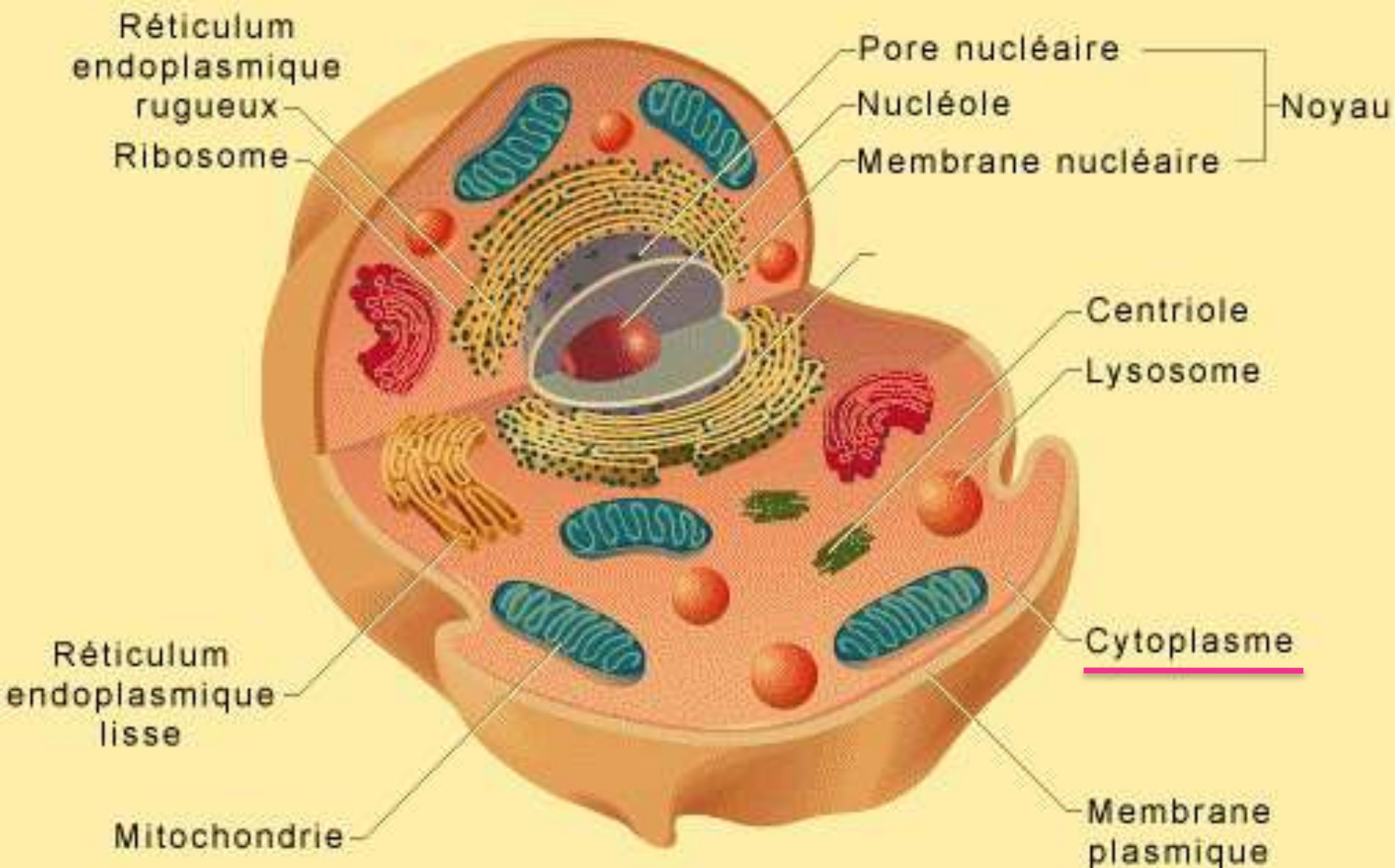


Chapitre III

LE CYTOSOL et LE CYTOSQUELETTE

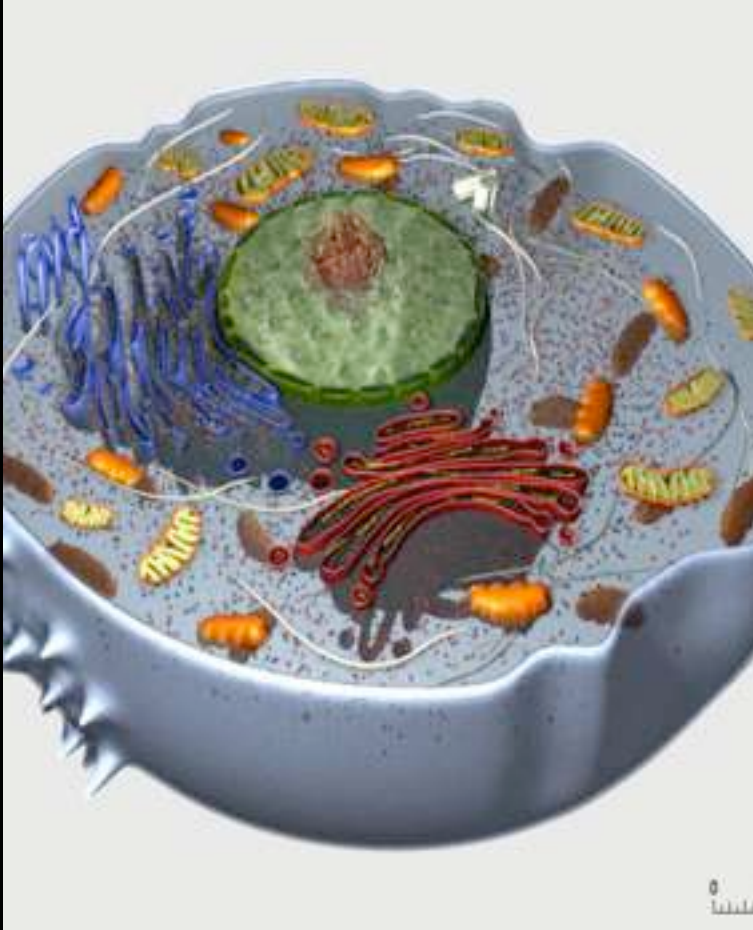
Pr. Boutaina BELQAT

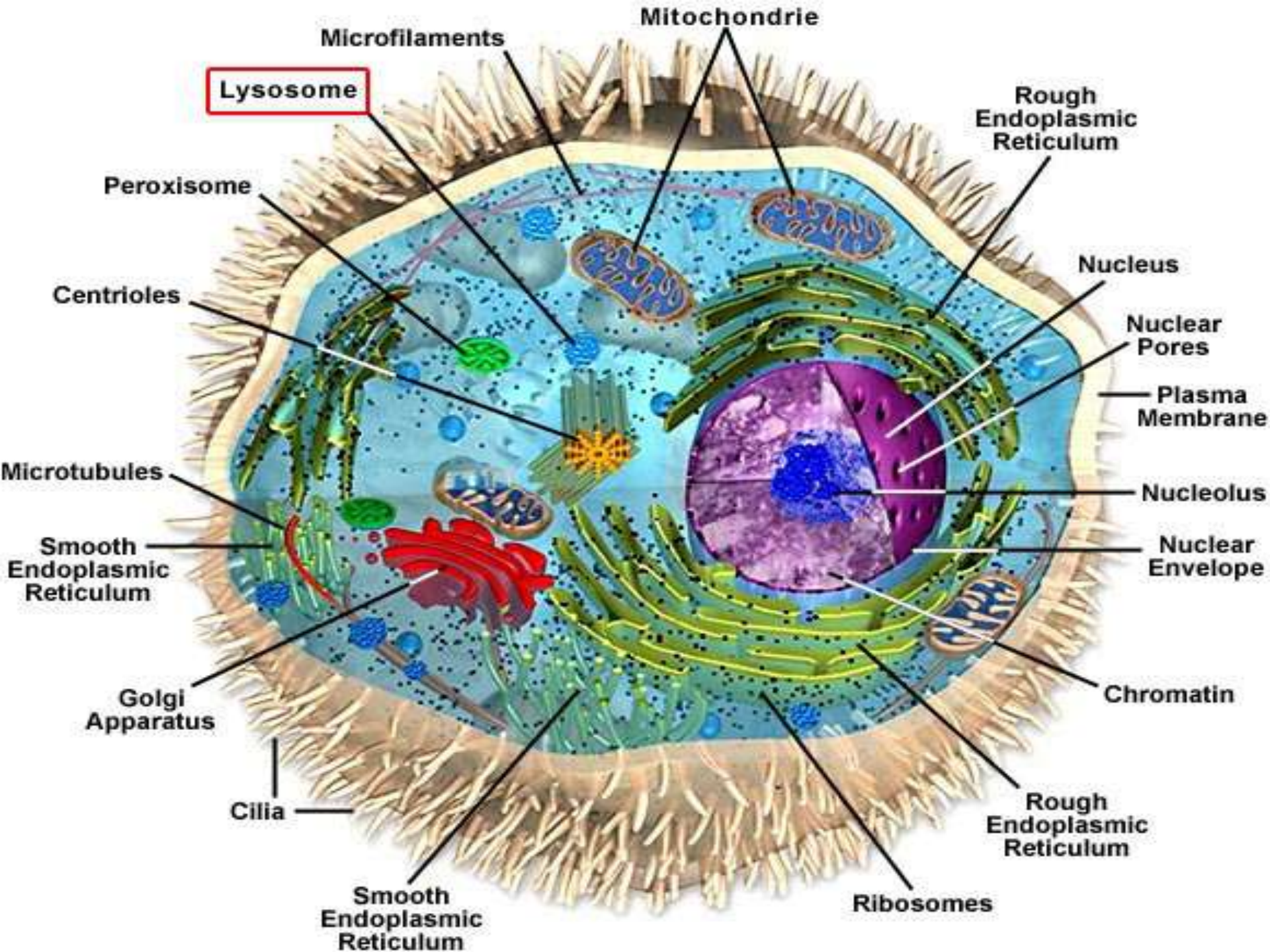
Structure d'une cellule eucaryote animale



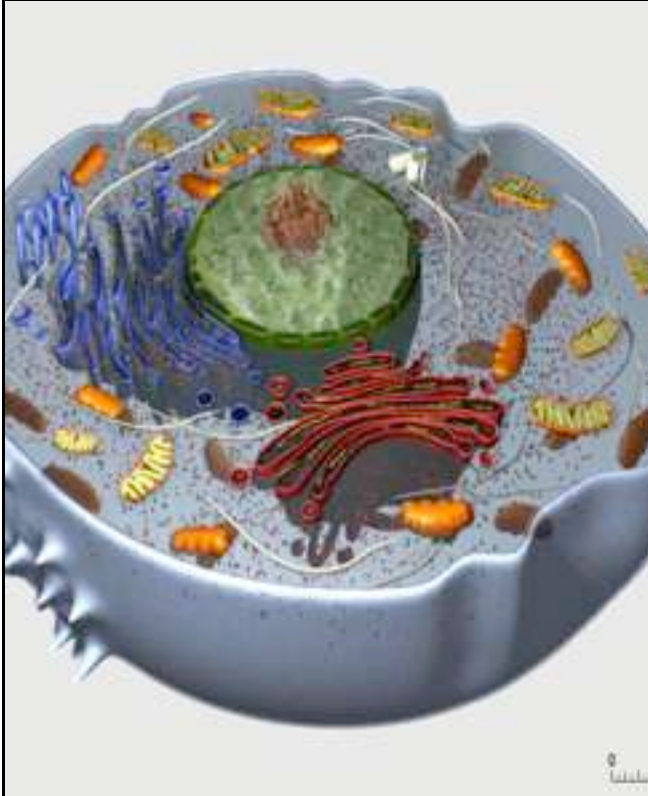
I- Définition 1: LE CYTOPLASME

- = **matériel biologique** contenu entre la membrane plasmique et la membrane nucléaire.
- = phase liquide qui contient de nombreux organites et des structures en suspension.
- = cytosol + cytosquelette + organites

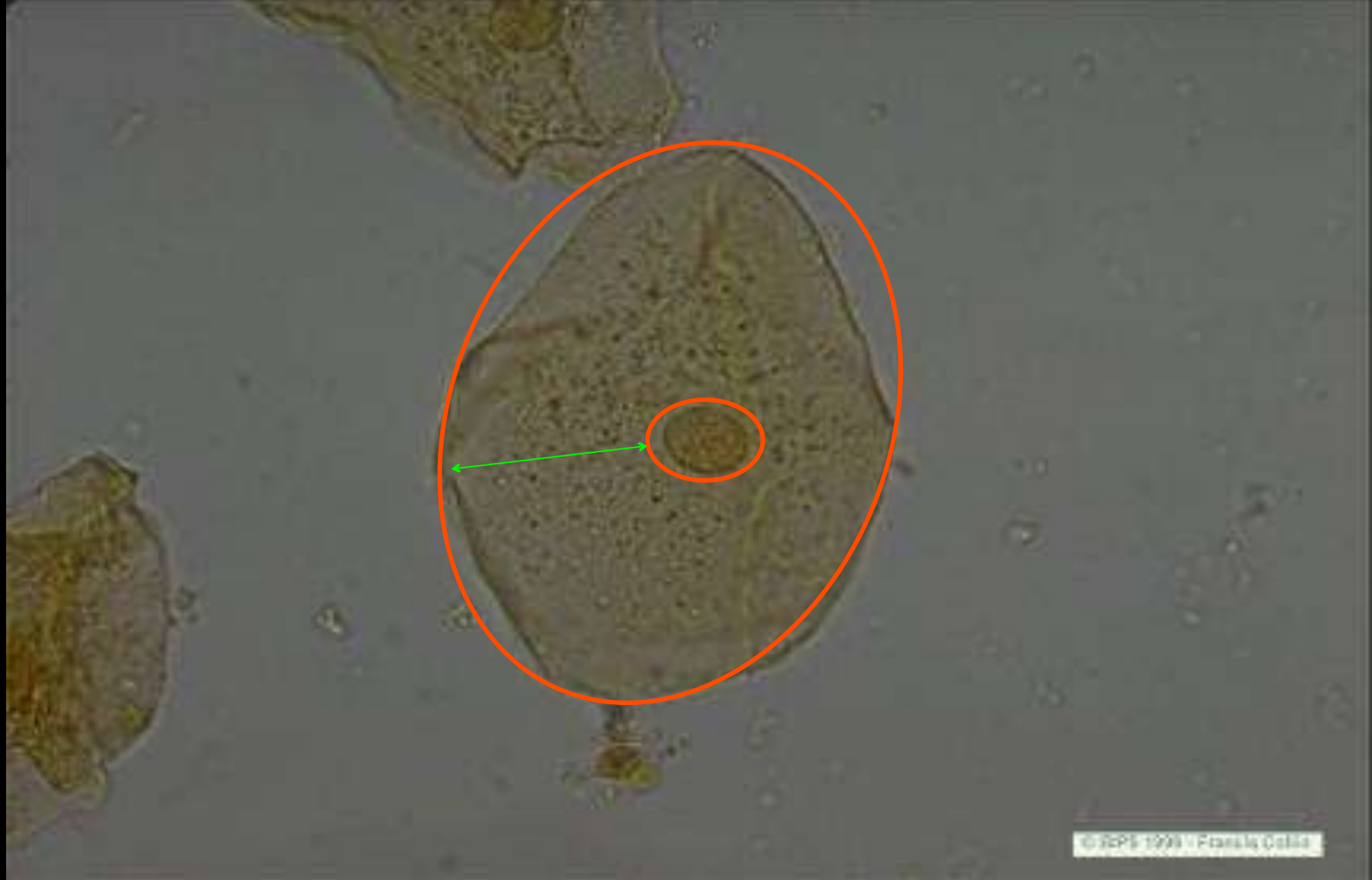




I- Définition 2: LE CYTOSOL



- = **phase liquide** où baignent les organites cytoplasmiques, tels que :
- Le noyau
- Le réticulum endoplasmique rugueux
- Le réticulum endoplasmique lisse
- L'appareil de Golgi
- Les ribosomes
- Les différentes vacuoles
- Les mitochondries et,
- Les chloroplastes (chez les plantes).



Le cytosol est limité par la membrane plasmique et l'enveloppe nucléaire et contient des substances solubles comme des **protéines**, des **enzymes** et de l'**ARN**.

I- Structure du cytosol

- En microscopie électronique, il apparaît granuleux alors qu'en microscopie optique il paraît optiquement vide. On peut des fois y différencier des globules lipidiques et des particules de glycogène qui disparaissent après avoir fourni de l'énergie utilisée par la cellule.
- Le **pH** de la phase soluble est proche de la neutralité. Avec ses macromolécules en suspension dans un milieu aqueux salé, le cytosol présente une viscosité 4 fois supérieure à celle de l'eau et correspond à un gel colloïde.

Composition biochimique

- Phase liquide ou semi-liquide
- Gel colloïde 4 fois plus visqueux que l'eau
- pH 7,0
- 85% d'eau

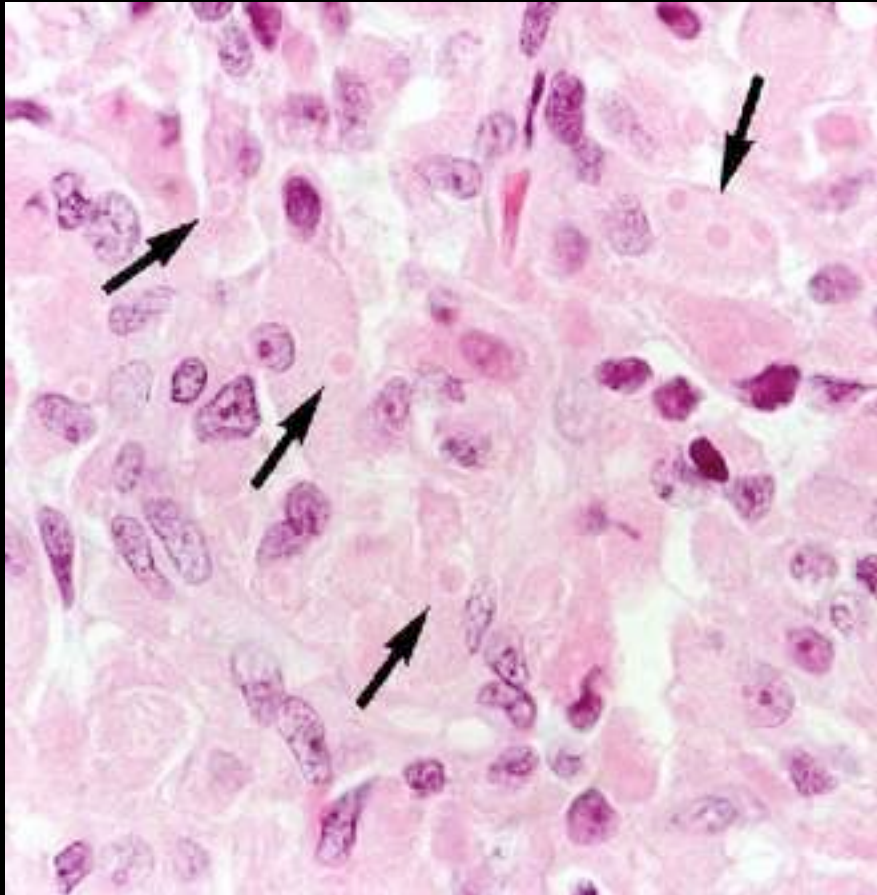
- Ions : Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺
- Gaz : O₂, CO₂
- Molécules simples : lipides, glucides, acides aminés ...
- Macromolécules : Protéines, polysaccharides, acides nucléiques ...

Les **graisses** et le **glycogène** sont stockés dans des vésicules sécrétoires

Les **nutriments** qui ne sont pas utilisés immédiatement pour la production d'ATP sont **stockés** sous une forme qui les rend **visibles au microscope optique**.

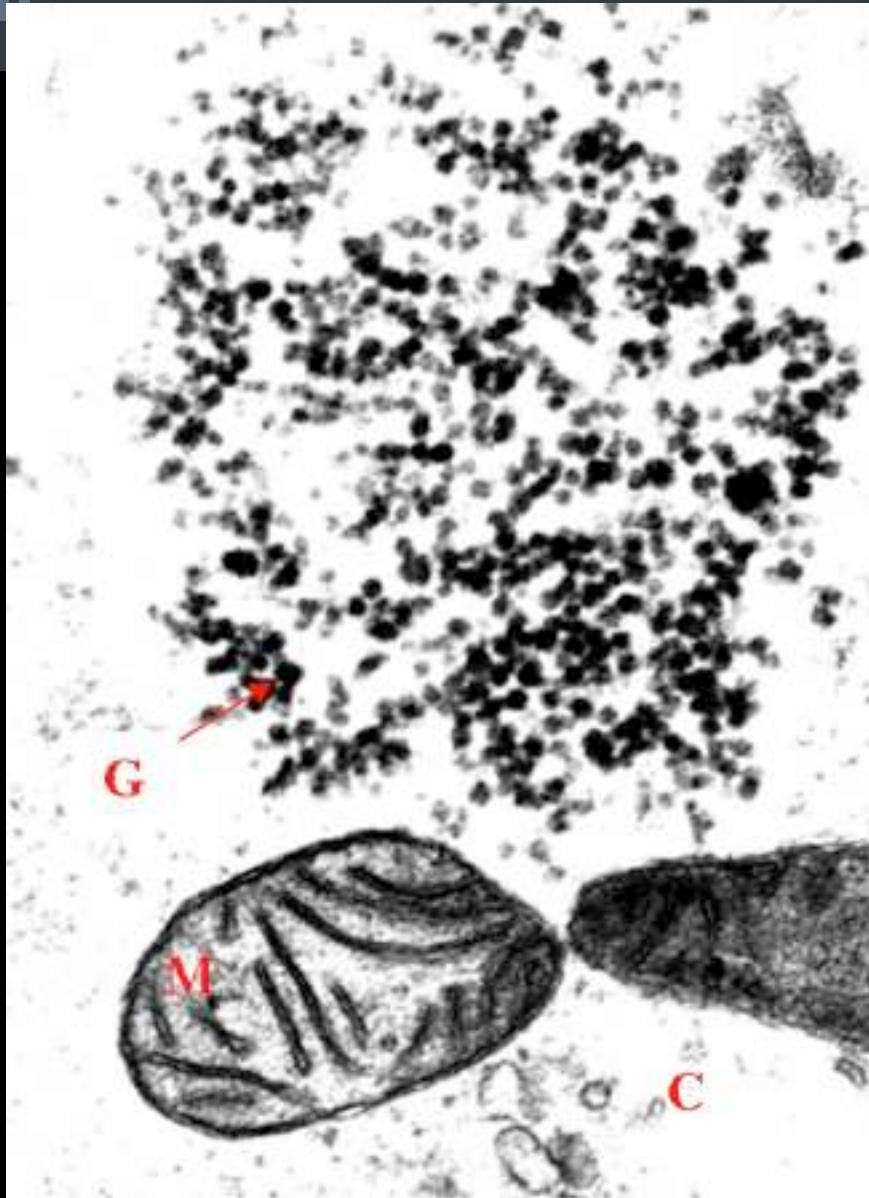
Les **inclusions** sont des **réserves** qui ne se trouvent pas dans toutes les cellules.

Inclusions de lipides dans les cellules adipeuses



- Figure 1. Micrographie en microscopie électronique montrant des inclusions de lipides

Particules de glycogène:



Stockées, visibles sous forme de **granules** ou de **grappes** dans le cytosol.

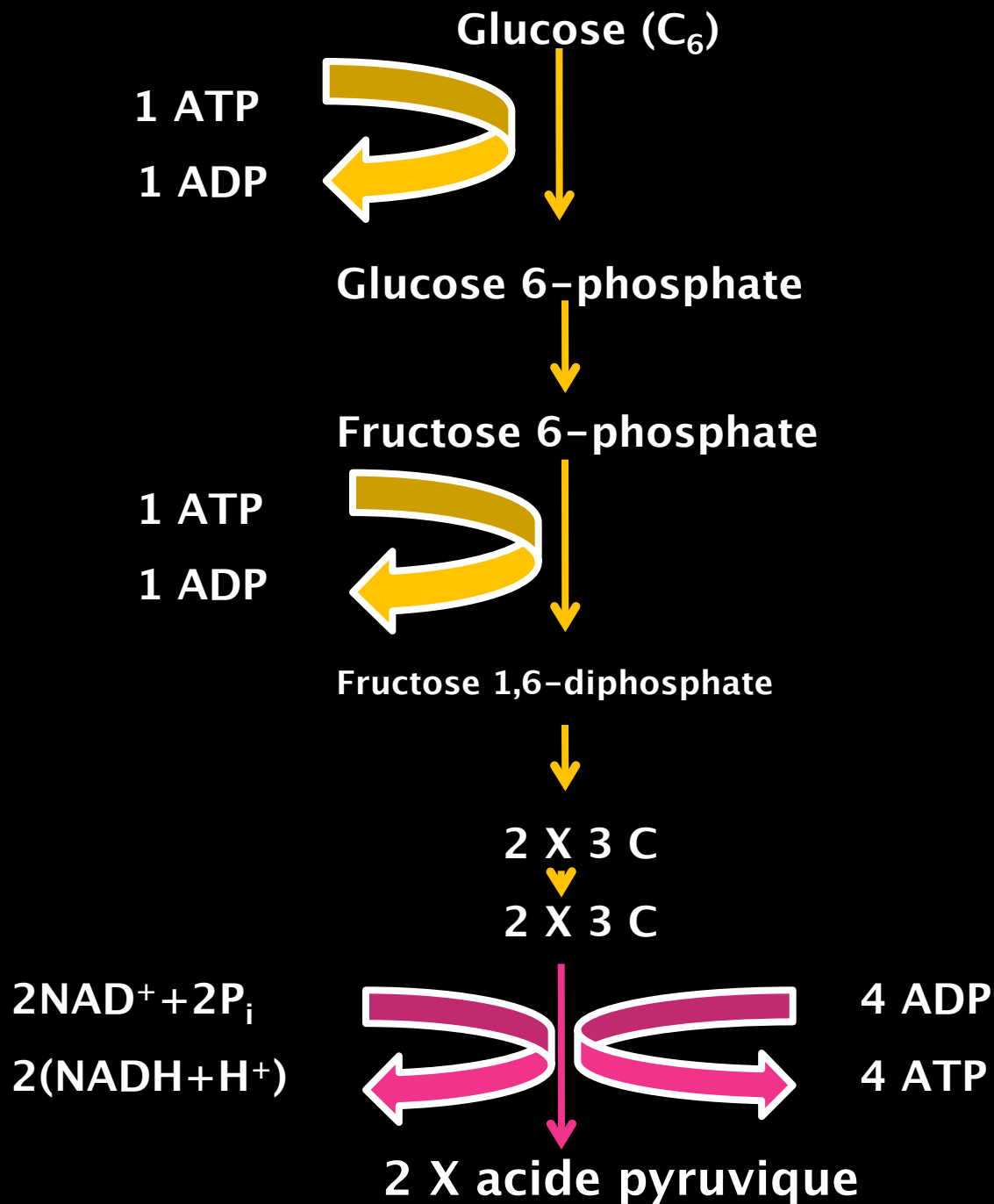
Figure 2. Micrographie en microscopie électronique montrant des grains de glycogène dans une cellule humaine. G : grains de glycogène ; M : mitochondrie ; C : cytosol.

II – Rôles et activités physiologiques

- Le cytosol est considéré comme étant le **carrefour des voies métaboliques** ; il intervient dans l'**anabolisme** et le **catabolisme** des **glucides**, des **acides aminés**, des **acides gras** et des **nucléotides**.
- **Trois grands types d'activités** sont associés aux **composants** du cytosol :
 - La **prise en charge du métabolisme intermédiaire** par les **enzymes** ;
 - La **synthèse des protéines** par les **ribosomes** ; et
 - Le **stockage de graisses**, de **glycogène** et de **vésicules sécrétoires**

II-1- Prise en charge du métabolisme intermédiaire

- Le **métabolisme intermédiaire** = l'ensemble des **réactions chimiques intracellulaires** qui interviennent dans la dégradation, la transformation et la synthèse de **petites molécules organiques**, comme les sucres simples, les acides aminés et les acides gras.
- La **totalité du métabolisme intermédiaire** a lieu dans le **cytosol**. Des milliers d'enzymes qui interviennent dans la **glycolyse** et dans d'autres **voies du métabolisme intermédiaire** sont localisées dans le **cytosol**.
- Les voies métaboliques qui concernent la molécule de **glucose** sont particulièrement importantes car elles concernent la **production d'énergie cellulaire (ATP)**.



II-2- Synthèse des protéines par les ribosomes

Les **ribosomes libres**, dispersées dans le cytosol **synthétisent** les **protéines** utilisées dans le **cytosol** même.

Par contre les **ribosomes** du **RER** synthétisent les **protéines** qui sont destinées à la **sécrétion** et à la formation de **nouveaux constituants cellulaires**.



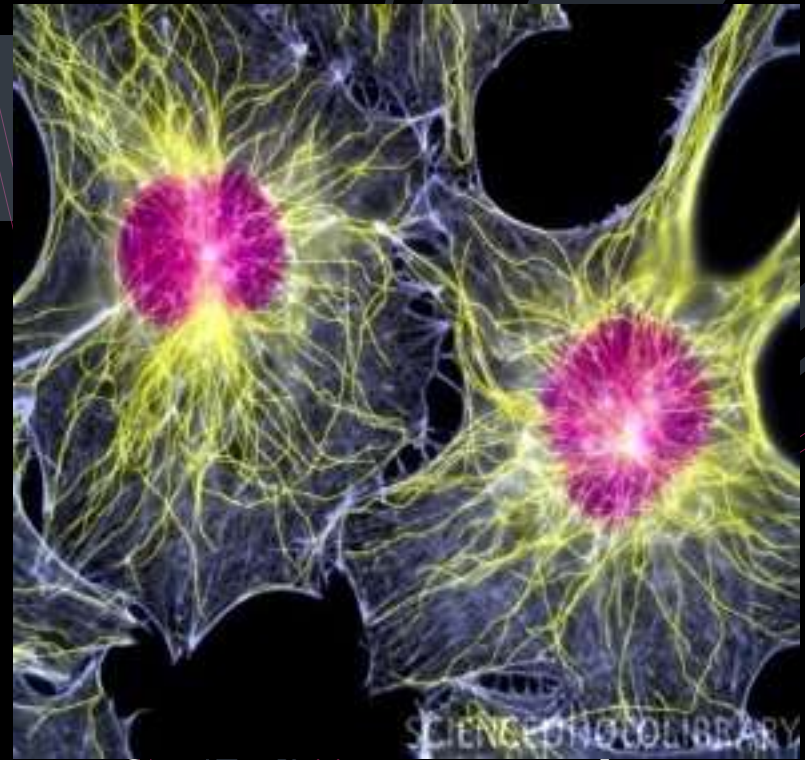
LE CYTOSQUELETTE

I- Définition

Le **cytosquelette** est un réseau de **filaments protéiques** variés, attachés à la membrane plasmique et à différents organites.

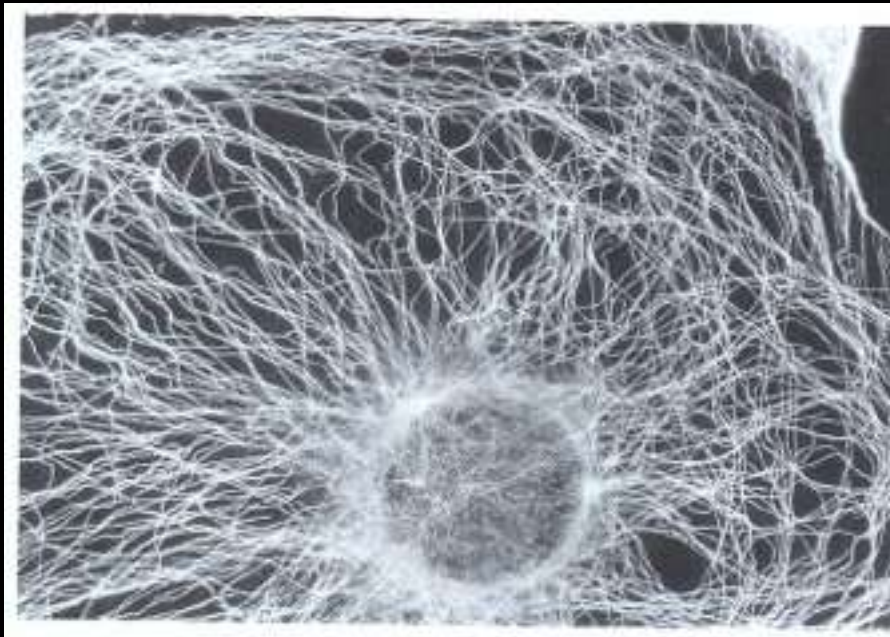
Il existe dans le cytoplasme de toutes les **cellules eucaryotes**.

Il fournit à la cellule une ossature lui permettant le **maintien de sa forme** et **l'exécution de ses mouvements**.

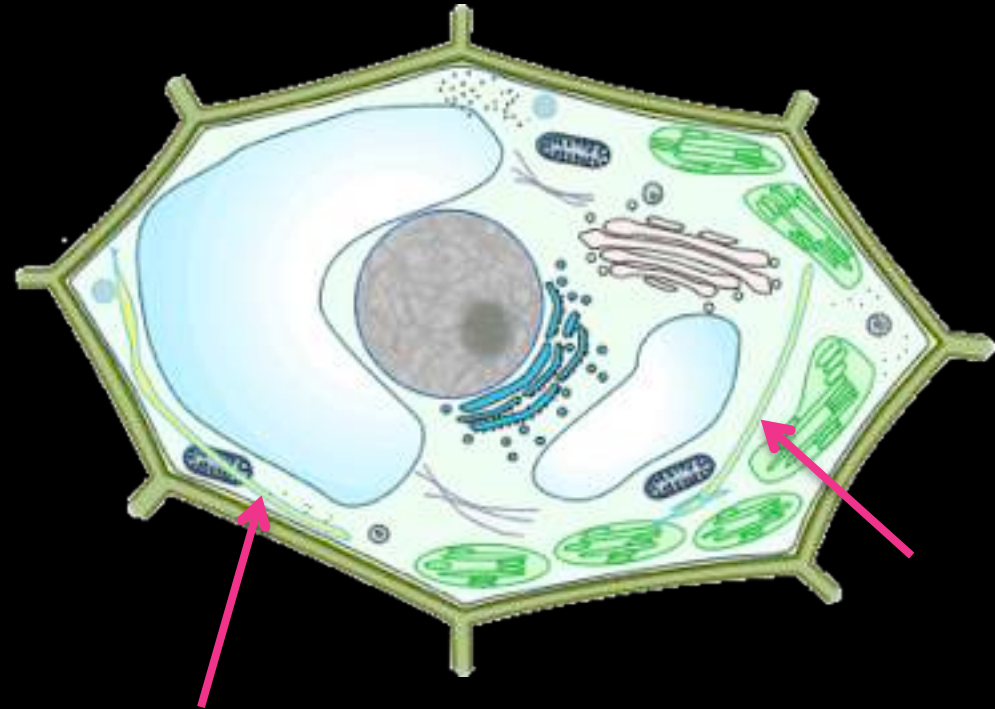


Les cytosquelettes de tous les eucaryotes sont assez similaires (bien que des différences importantes existent entre les cellules animales et végétales)

Cytosquelette des cellules animales



Cytosquelette des cellules végétales



Le cytosquelette des procaryotes

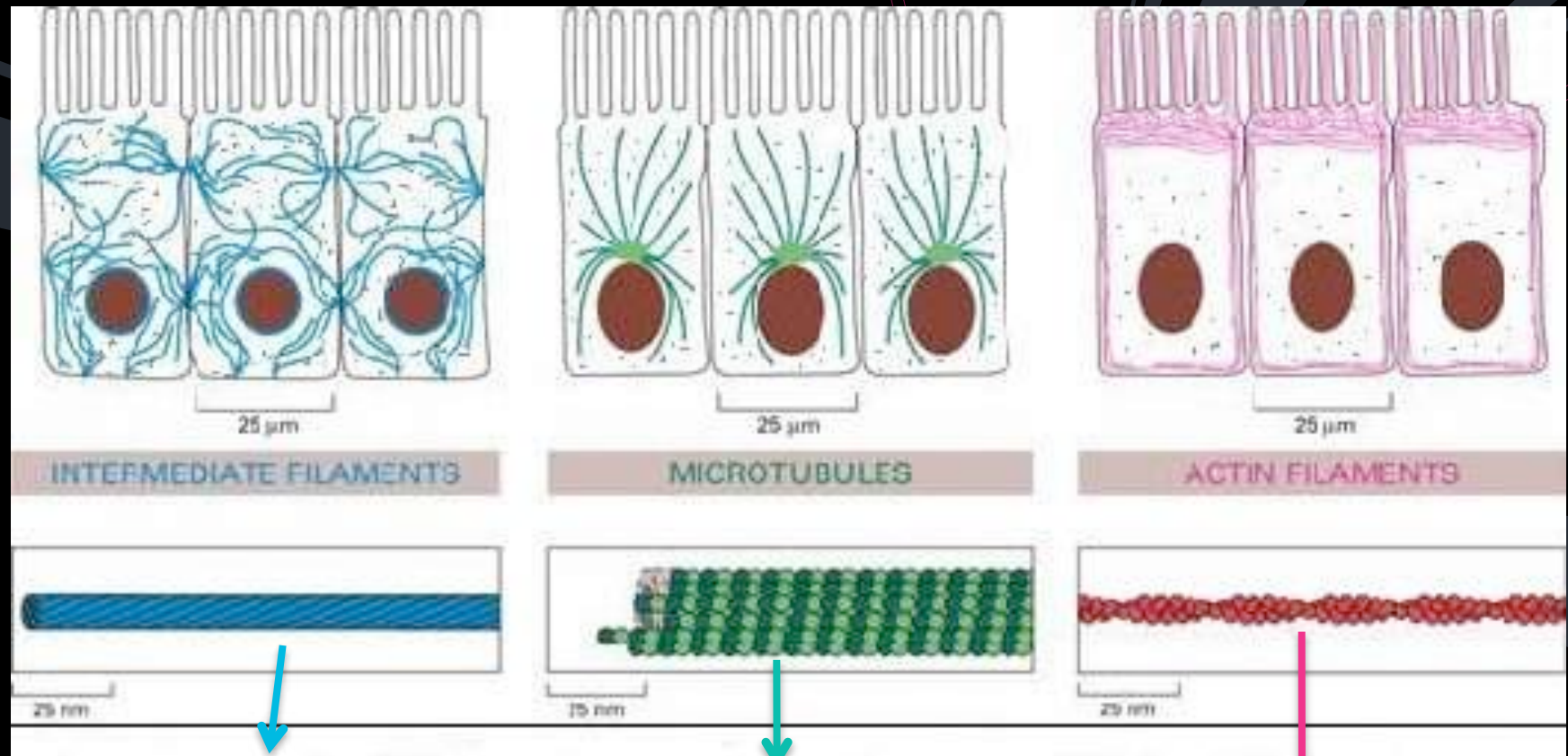
Récemment découverts chez les procaryotes, les cytosquelettes semblent organisés de façon tout à fait différente de ceux des eucaryotes.

Les travaux de certains chercheurs, notamment ceux de Rut Carballido-López et de son équipe, ont récemment mis en évidence la présence d'un **cytosquelette** chez les **procaryotes**.

Ces chercheurs ont découvert la **protéine Mreb**, homologue à la protéine d'actine, et de structure similaire, localisée sous la membrane et semblant jouer un rôle important dans la structure et la forme cellulaire.

II- Composition et Structure globale du cytosquelette

Le cytosquelette des eucaryotes est formé de **trois structures** filamenteuses bien définies qui forment ensemble un **réseau interactif** élaboré :



Fibres résistantes
(diverses protéines de structure semblable)

composés d'une protéine, la **tubuline**

sont formés d'**actine**

Structure globale du cytosquelette

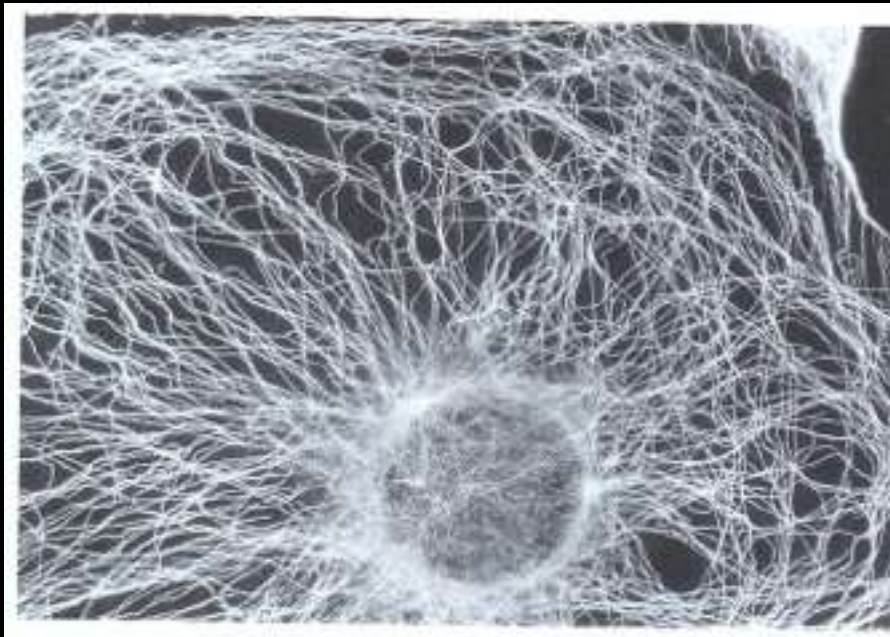
- Microtubules : Tubuline
- Filaments intermédiaires: fibres protéiques de structure semblable
- Microfilaments: filaments d'actine

Ces filaments protéiques sont **unis** à :

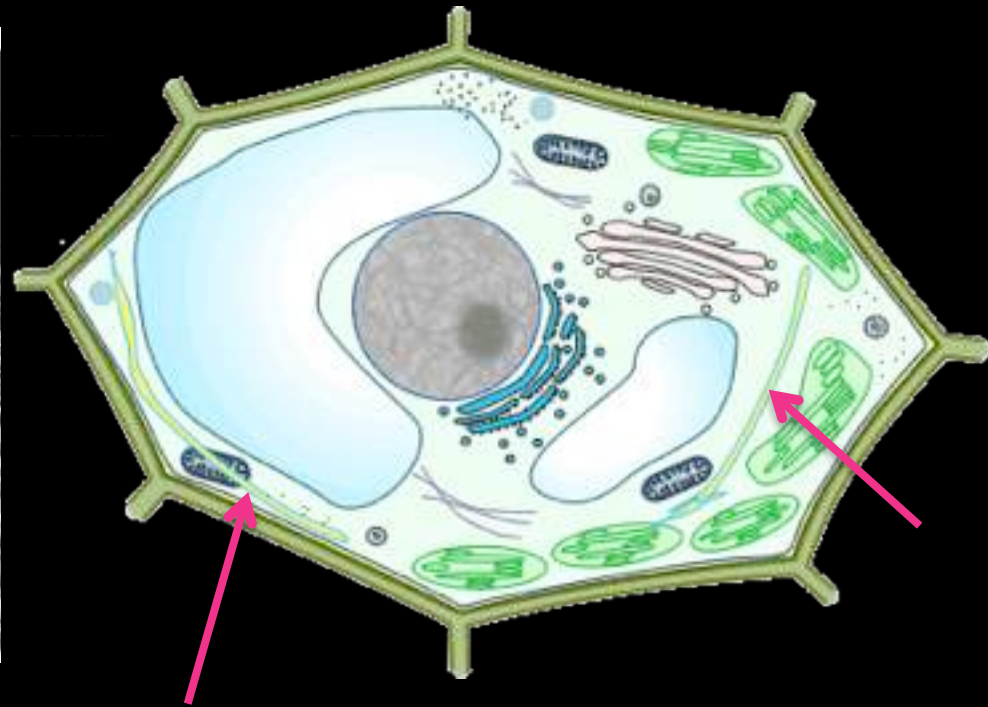
- des protéines motrices qui organisent les fibres du cytosquelette et à,
- des protéines associées qui interviennent dans la réalisation de l'organisation structurale des fibres du cytosquelette.

Chez les **végétaux**, la forme de la cellule étant principalement définie par l'interaction pression osmotique/résistance de la paroi, on constate une moindre importance du cytosquelette : absence de microfilaments d'actine et de filaments intermédiaires (sauf au niveau du noyau).

Seul le réseau de **microtubules** est **développé**. Il est plaqué contre la membrane (Fig. 7) et on pense qu'il intervient dans le sens de synthèse des fibres de cellulose de la paroi squelettique

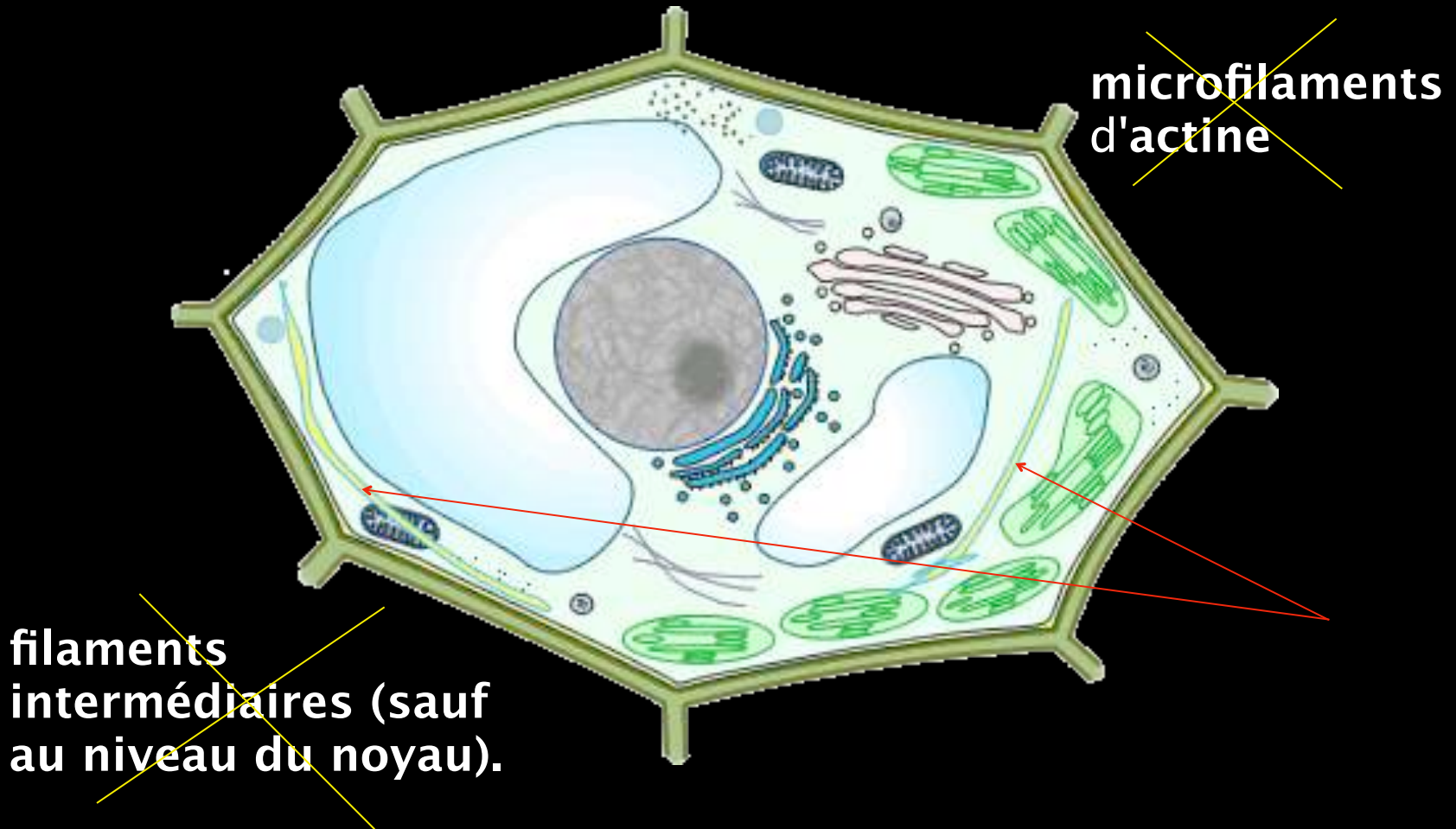


Cytosquelette des cellules animales



Cytosquelette des cellules végétales

Chez les végétaux, la forme de la cellule étant principalement définie par l'interaction pression osmotique/résistance de la paroi, on constate une moindre importance du cytosquelette : → → →



Filaments intermédiaires

Fonctions du cytosquelette

(1) Structure et support

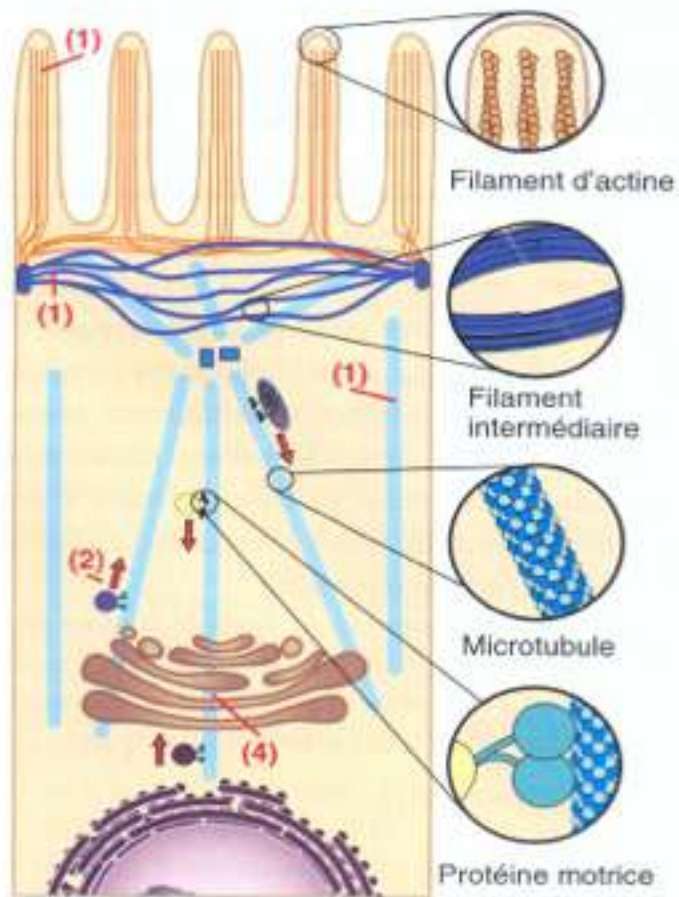
(2) Transport intracellulaire

(3) Contractilité et motilité

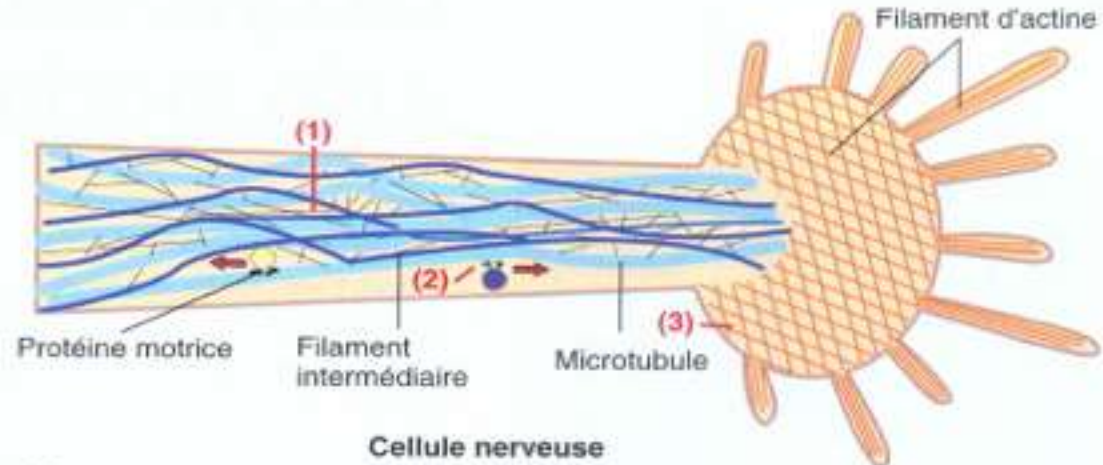
(4) Organisation spatiale

(1) Filament d'actine

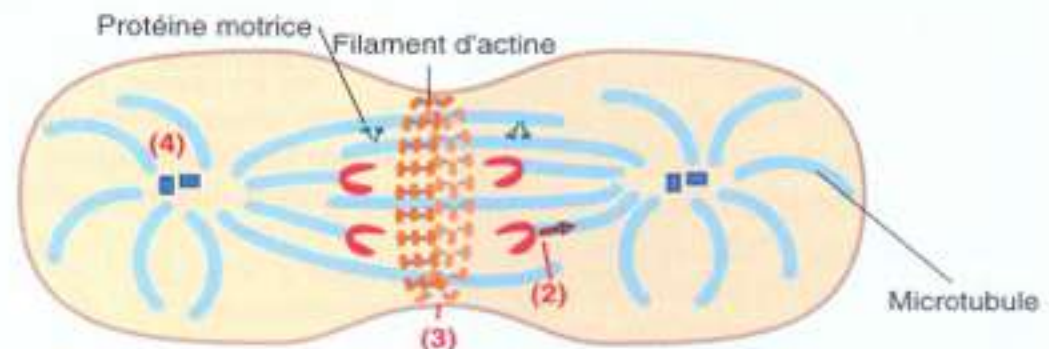
(2) Microtubules



(a) Cellule épithéliale



(b)



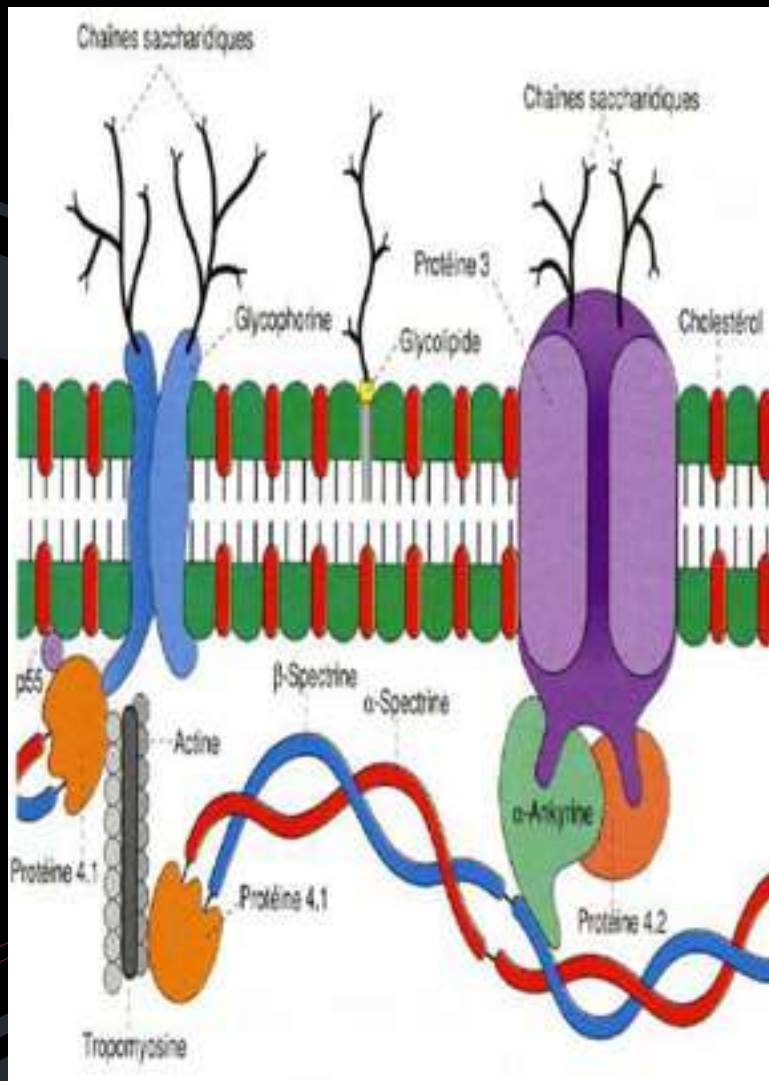
(c)

Cellule en division

Figure 9.1 Aperçu général de la structure et des fonctions du cytosquelette. Représentation schématique (a) d'une cellule épithéliale, (b) d'une cellule nerveuse et (c) d'une cellule en division. Les microtubules des cellules épithéliale et nerveuse servent surtout de soutien et de moyen de transport pour les organites, tandis que la cellule en division produit le fuseau mitotique indispensable à la

ségrégation des chromosomes. Les filaments intermédiaires apportent un soutien structural aux cellules épithéliale et nerveuse. Les microfilaments supportent les microvillosités de la cellule épithéliale et font partie intégrante du mécanisme impliqué dans l'élongation de la cellule nerveuse et dans la division cellulaire.

Cytosquelette sous-membranaire de l'hématie



Cytosquelette ancré à la membrane plasmique par plusieurs protéines

Rôle du cytosquelette de l'hématie



- Maintien de la forme discoïdale biconcave
- Plasticité des hématies
- Déformation des hématies dans la lumière des capillaires de $4 \mu\text{m}$ de \emptyset

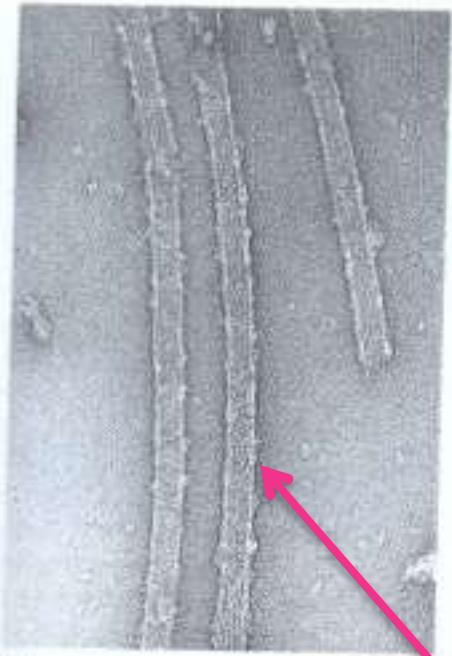
II-4- Les microtubules

II-4-1- Structure et composition

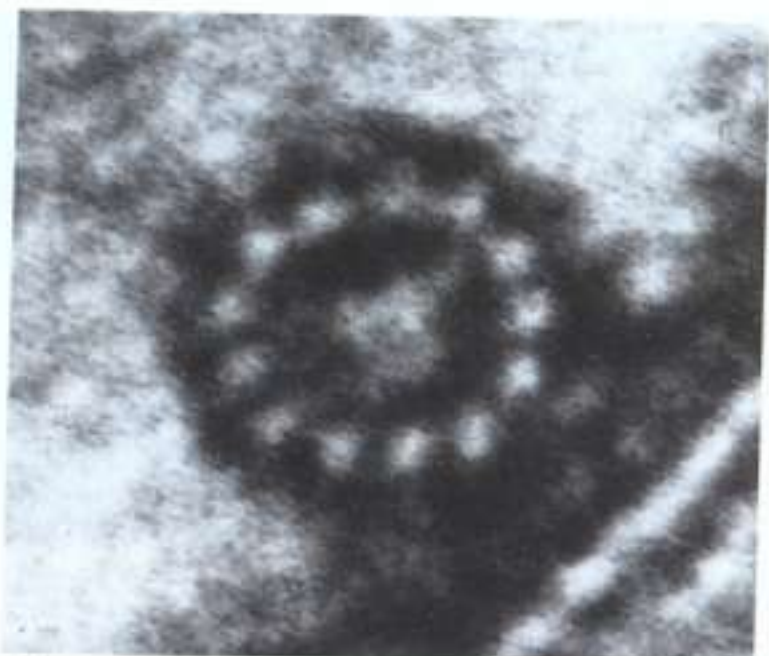
= **Structures cylindriques creuses** présentes dans presque toutes les cellules eucaryotes.

- ➡ Diamètre d'environ 24 nm,
- ➡ Paroi épaisse d'environ 5nm
- ➡ Longueur peut atteindre la longueur ou la largeur d'une cellule.

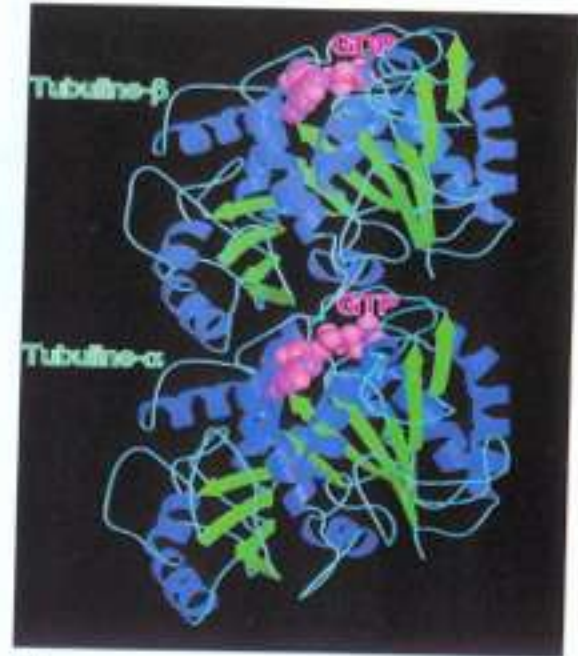
La **paroi** du microtubule est composée de **protéines tubulaires** disposées en rangées longitudinales = **protofilaments**, alignés parallèlement au grand axe du tubule (Fig. 8.9a).



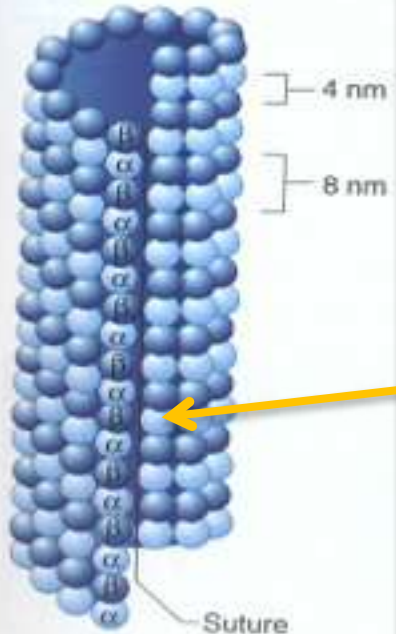
(a) 100 nm



(b)

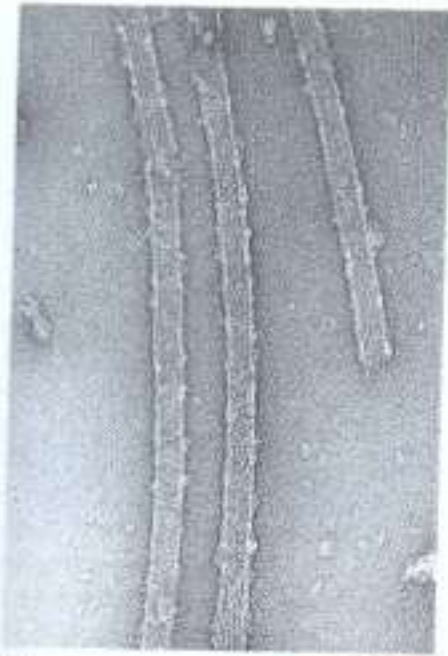


(c)

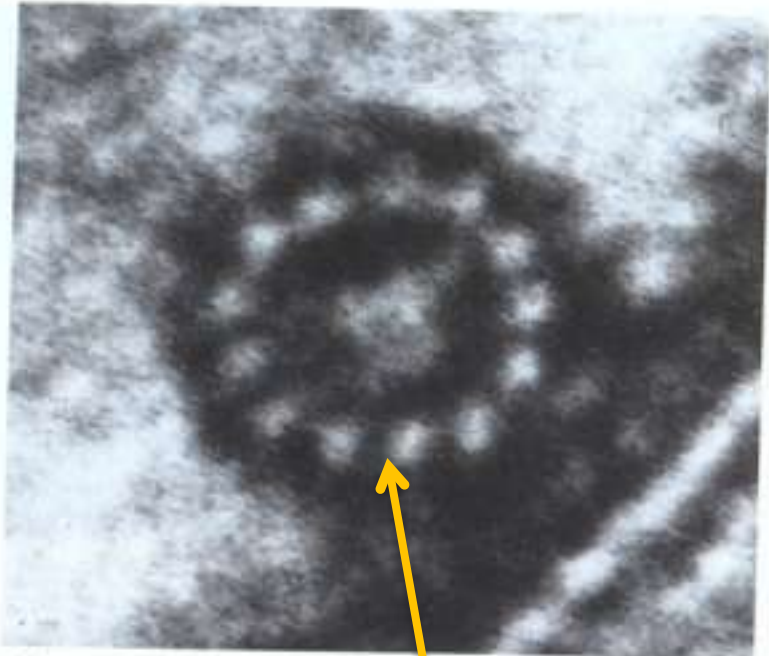


(d) Suture

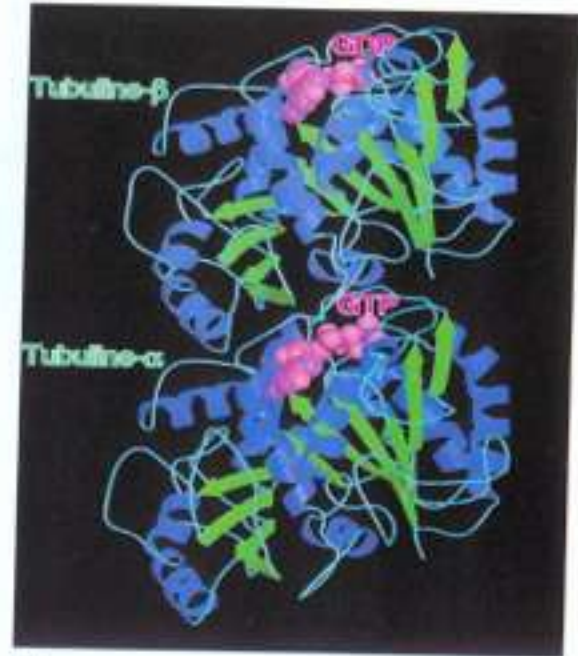
La **paroi** du microtubule est composée de **protéines tubulaires** disposées en rangées longitudinales = **protofilaments**, alignés parallèlement au grand axe du tubule (a,d).



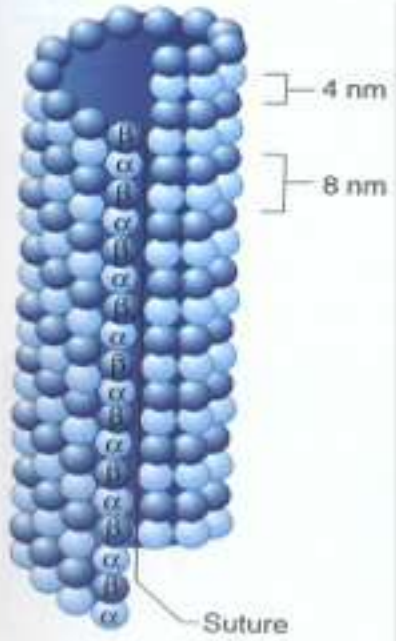
(a) 100 nm



(b)

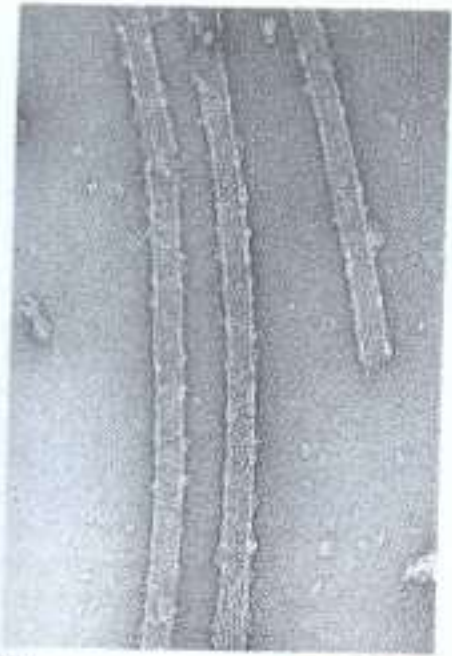


(c)

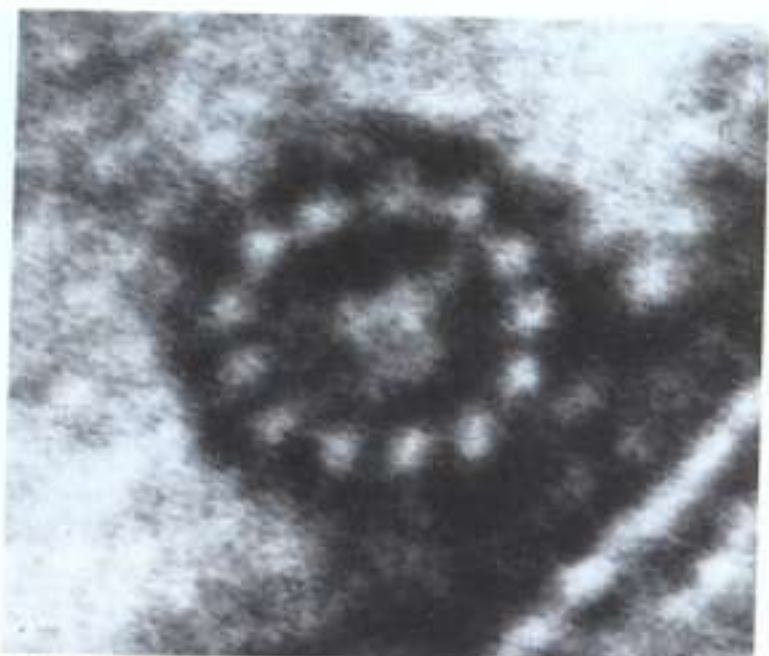


(d)

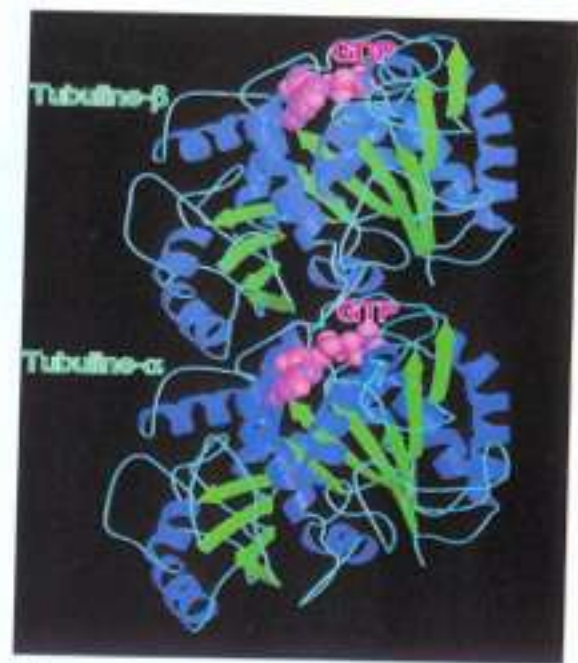
En coupe transversale, les microtubules montrent **13 protofilaments** disposés en cercle dans la cellule (b).



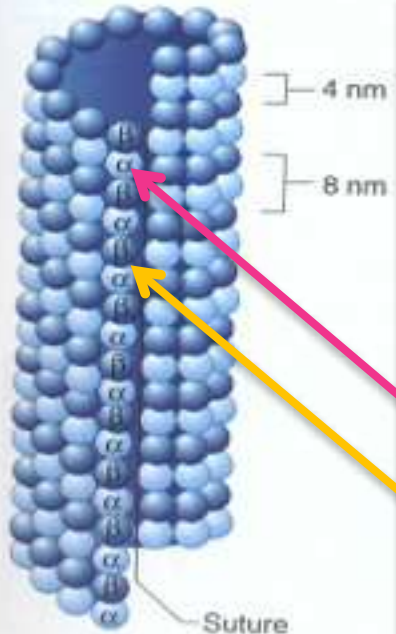
(a) 100 nm



(b)



(c)

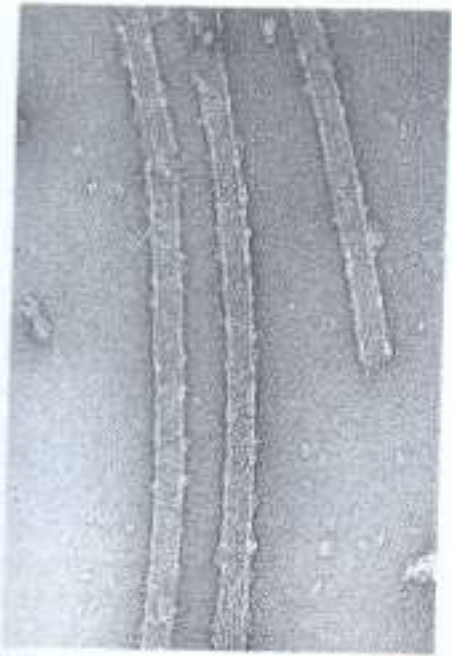


(d)

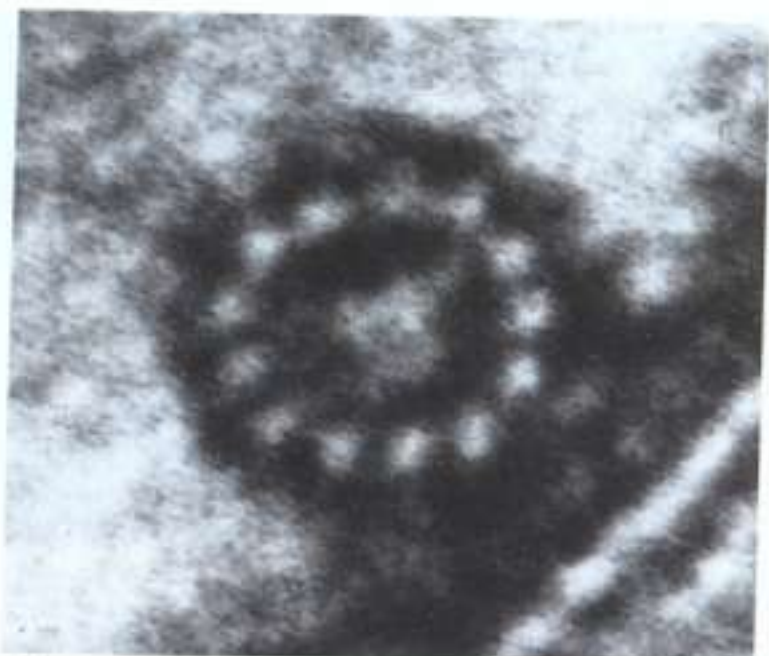
Chaque **protofilament** est lui-même constitué de deux hétérodimères de **tubuline** :

- tubuline-alpha α
- tubuline-beta β

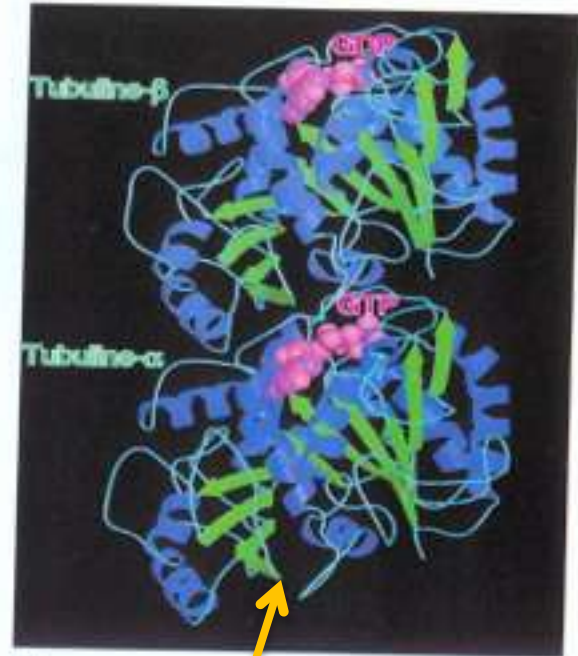
reliés par des liaisons non-covalentes.



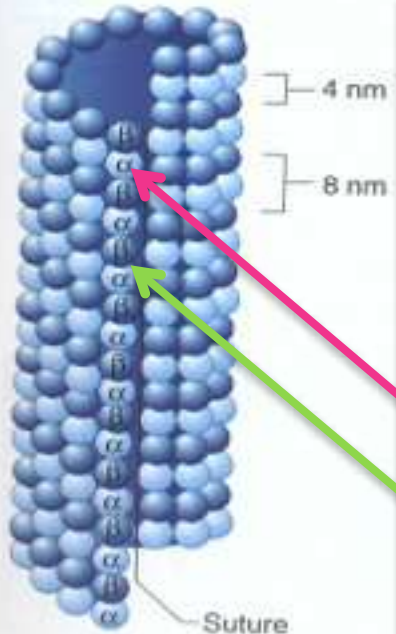
(a) 100 nm



(b)



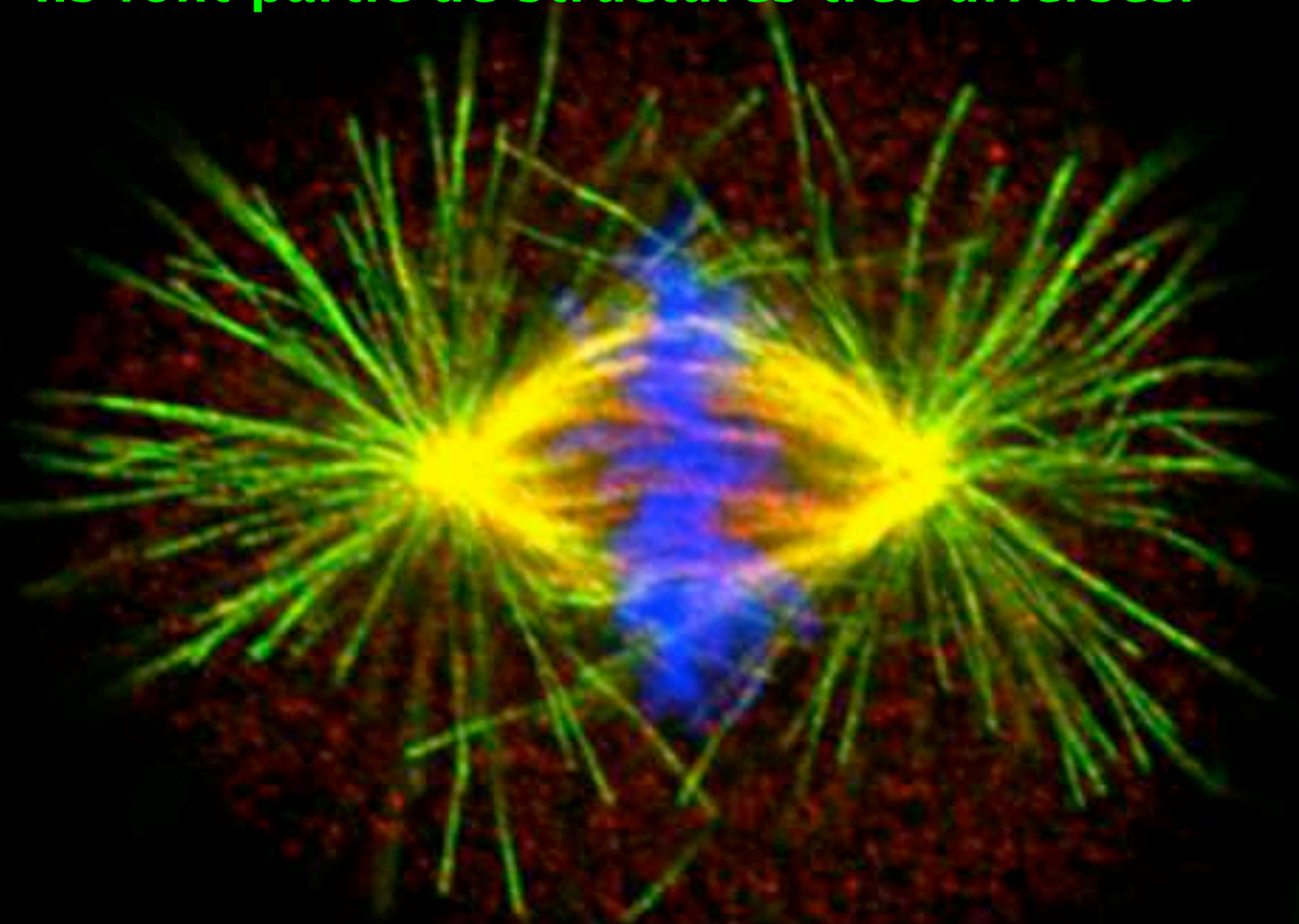
(c)



(d) Suture

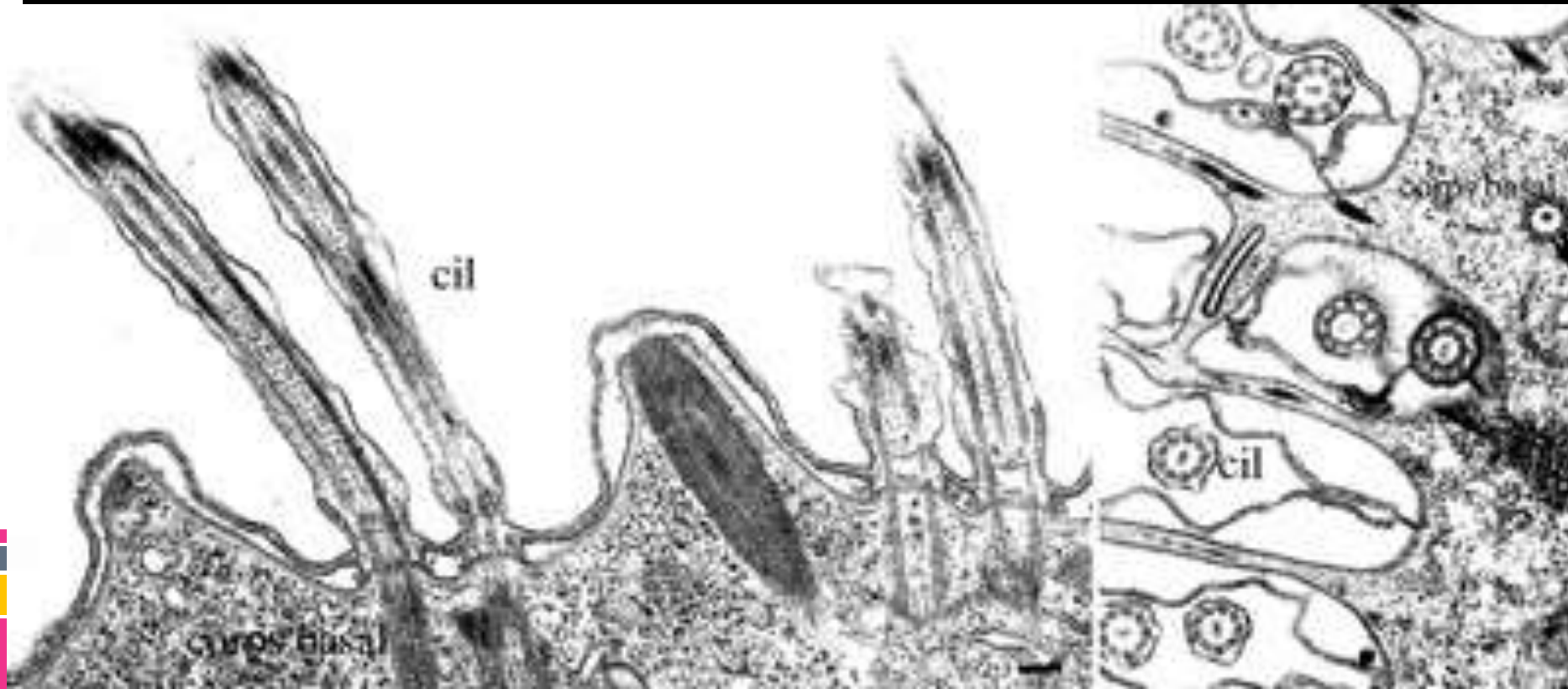
Les deux sous-unités de tubuline ont la même structure tridimensionnelle, s'adaptent l'une à l'autre (c) et sont réparties linéairement le long des protofilaments (d).

Ils font partie de structures très diverses:



Le fuseau achromatique d'une cellule en division









Ils font partie de structures très diverses:

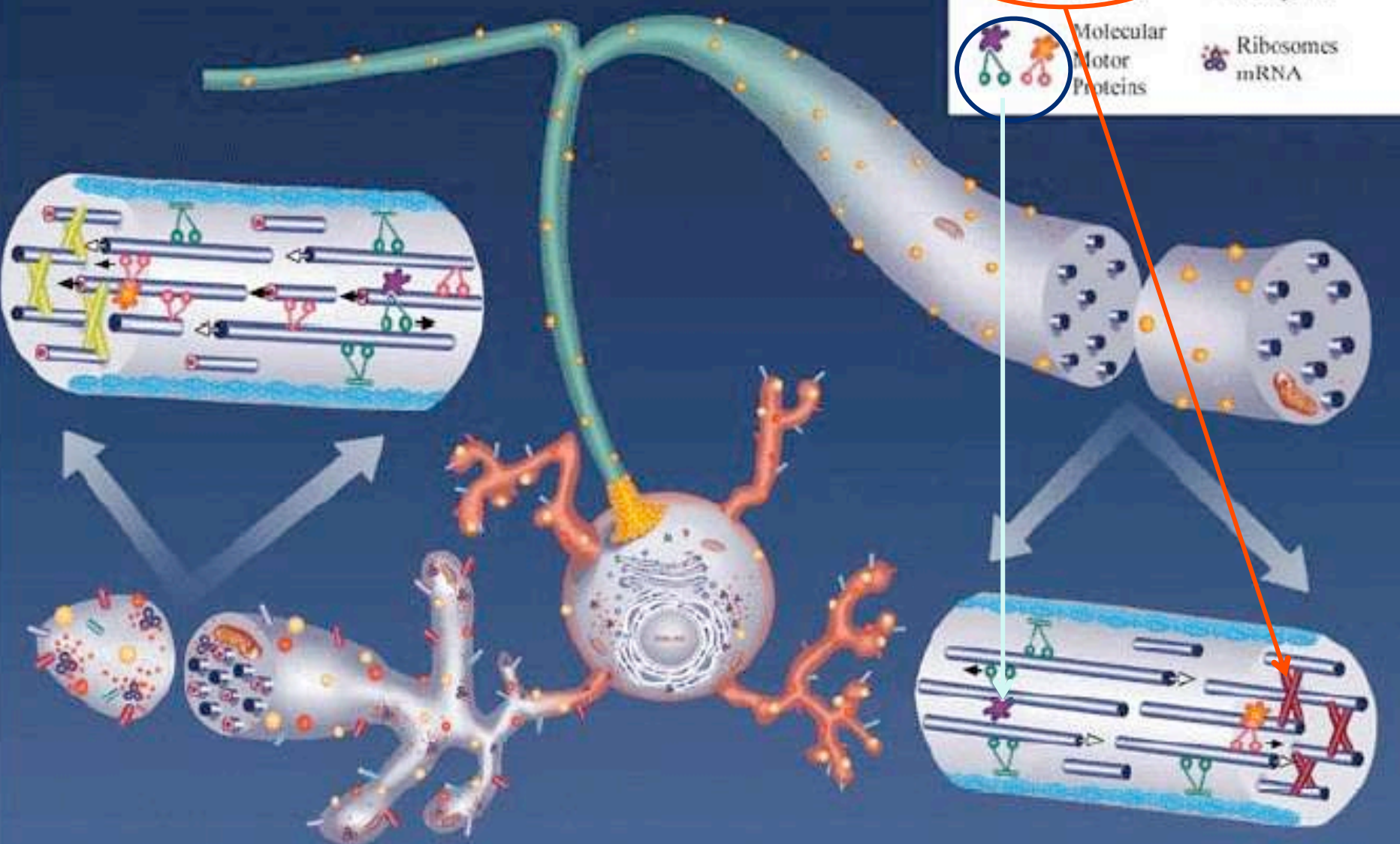


L'axe des cils et flagelles.

II-4-2- Les protéines associées

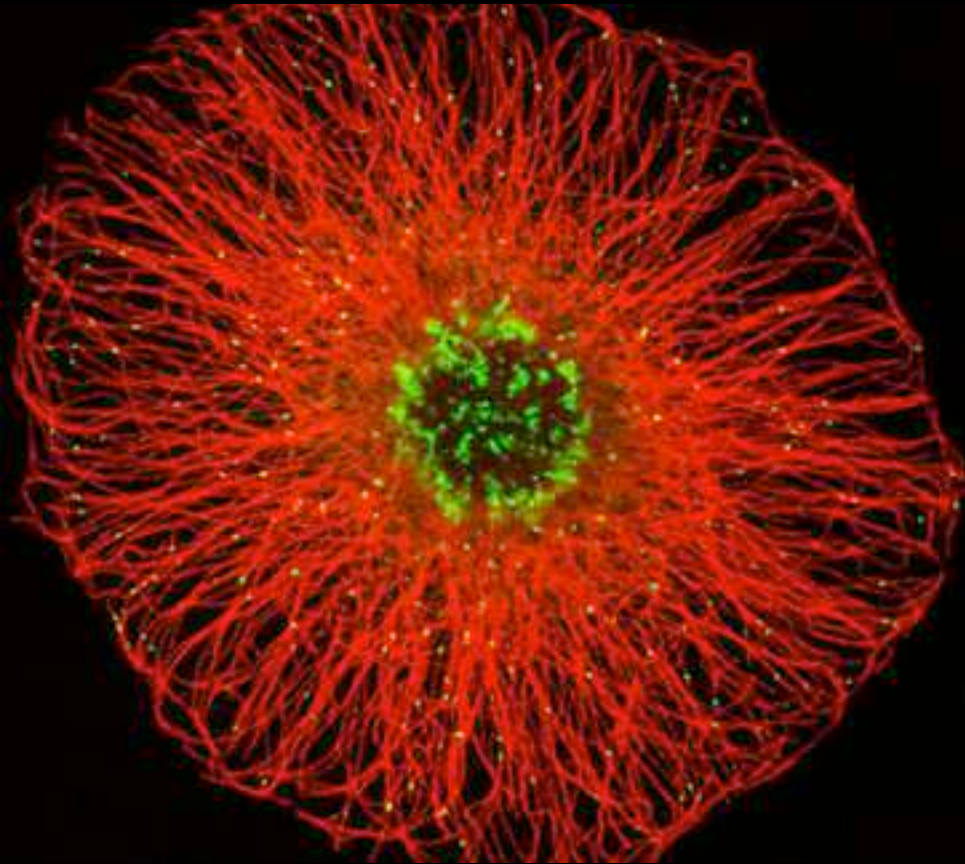
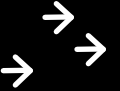
- Il existe des **protéines associées aux microtubules** ou **MAP**, les unes ont un rôle dans la stabilisation des microtubules, les autres sont spécialisées dans le mouvement des vésicules et des organites le long des microtubules ; ce sont des ATPases :
 - Les kinésines et,
 - Les dynéines qui transportent des vésicules dans des sens opposés.

-  Actin
-  Microtubules
-  Microtubule Associated Proteins
-  Molecular Motor Proteins
-  Ion Channels
-  Neurotransmitter Receptors
-  Neurotrophin Receptors
-  Ribosomes mRNA



II-4-3- Rôle des microtubules

II-4-3-1- Les microtubules = supports structuraux

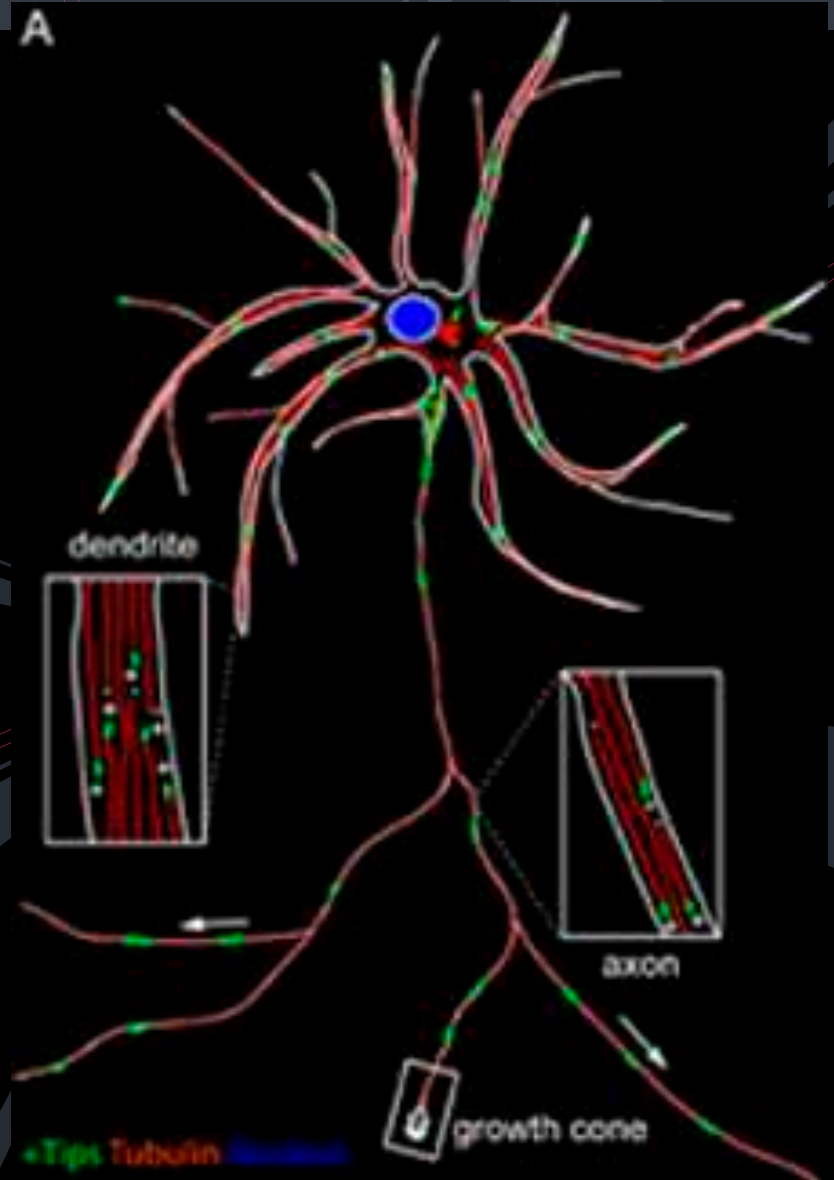


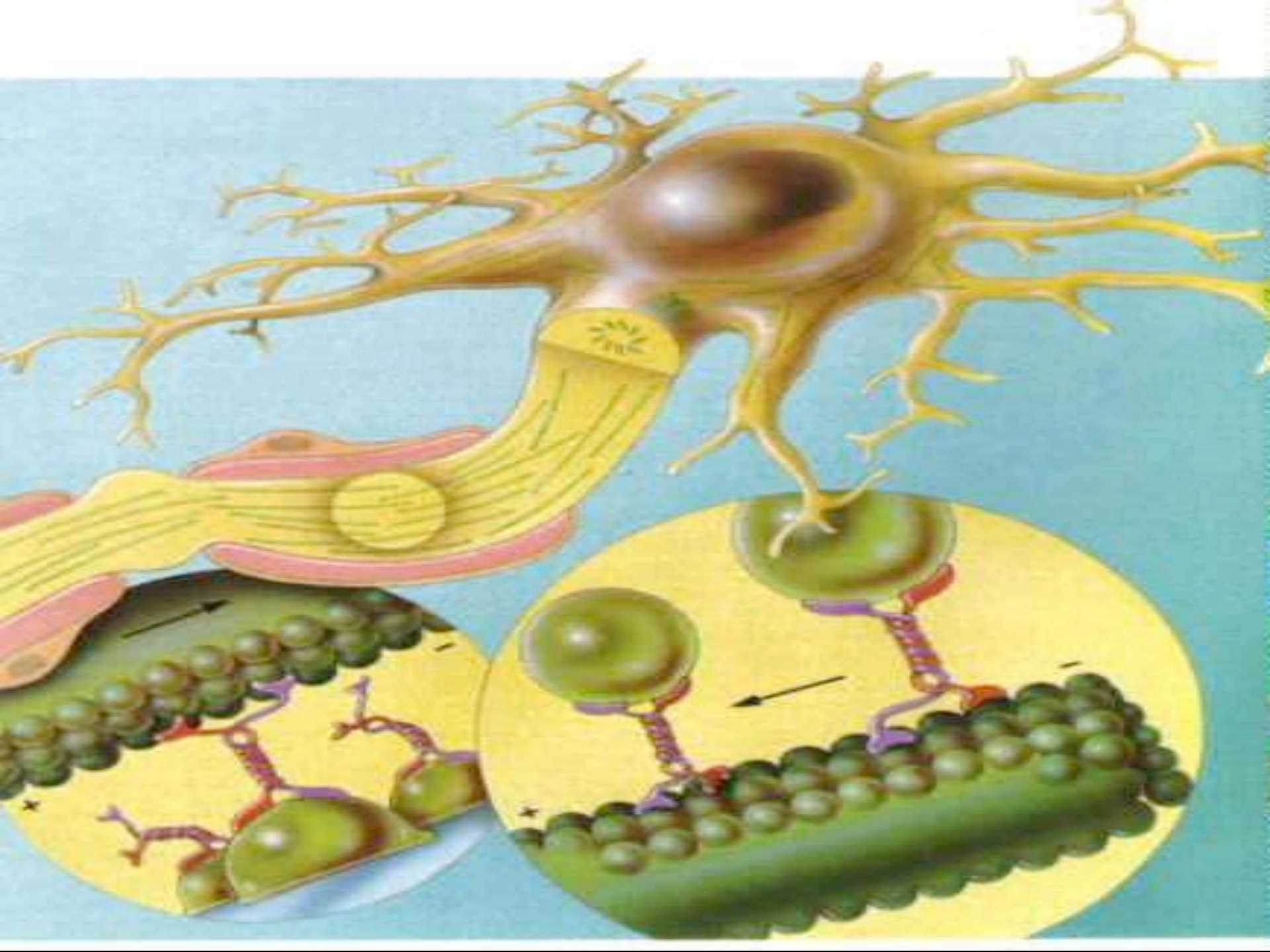
La **répartition** des microtubules est généralement en rapport avec la **forme** de la cellule.

II-4-3-2- Rôle des microtubules dans le transport cytoplasmique

Les déplacements cellulaires se font avec la concurrence entre:

- Les microfilaments d'actine et
- les microtubules.





II-4-3-3- Rôle des microtubules dans la mobilité cellulaire

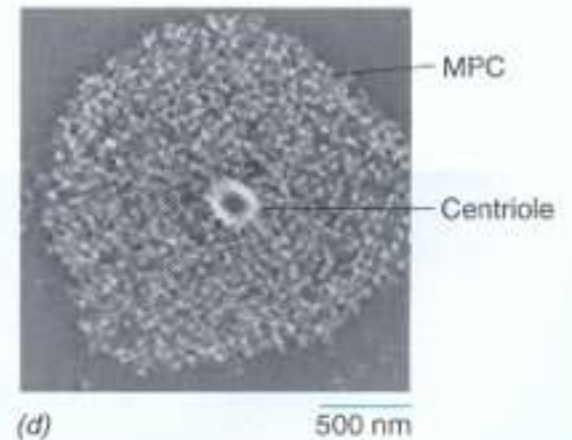
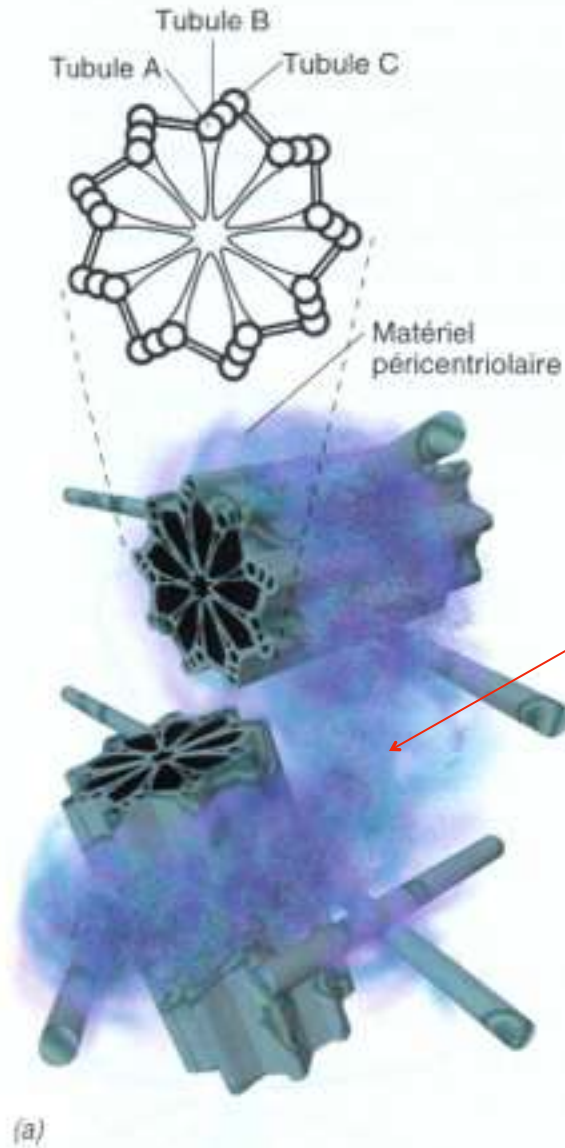
Spermatozoïdes



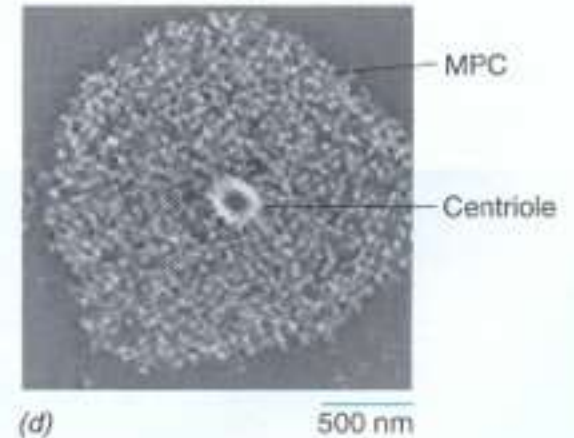
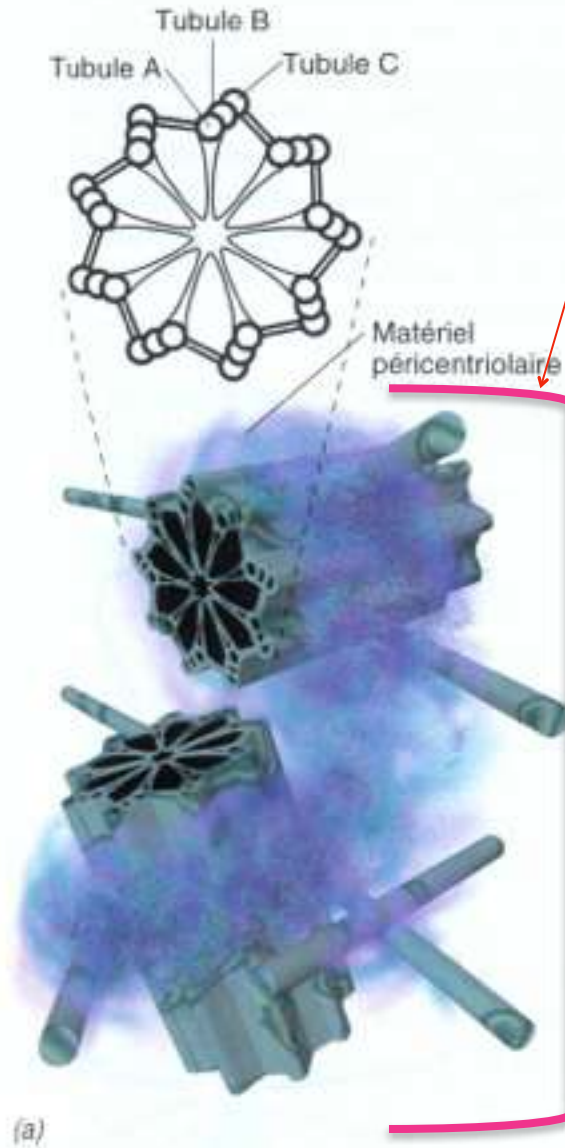
Protozoaire (Paramécie)



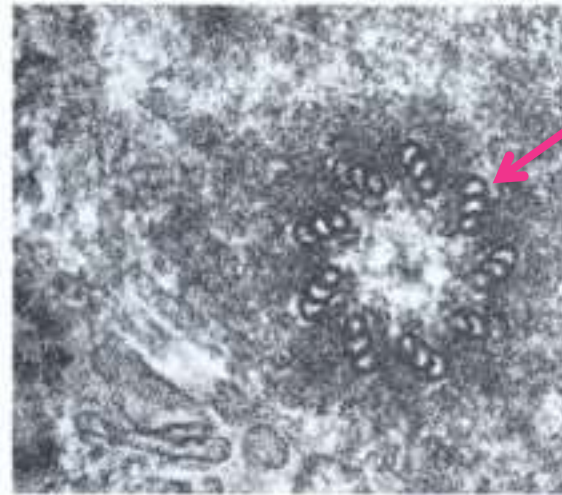
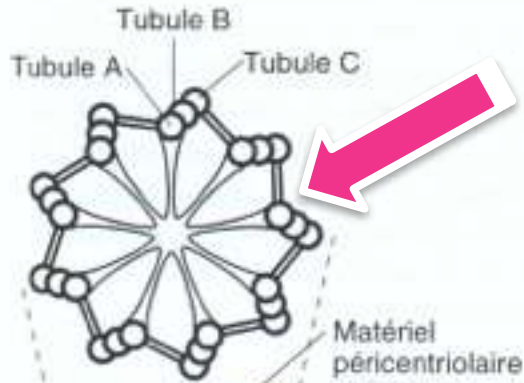
II-4-4- Les centres organisateurs des microtubules



II-4-4- Les centres organisateurs des microtubules



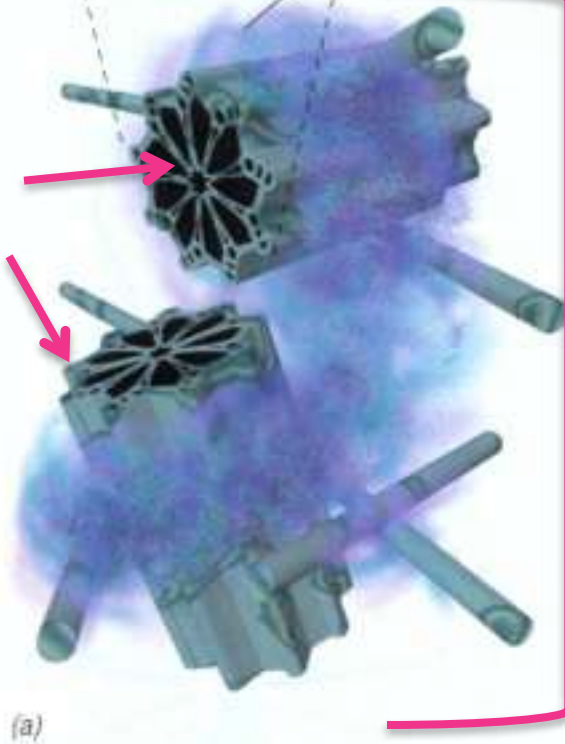
II-4-4- Les centres organisateurs des microtubules



Un **centriole** est formé de 9 groupes de 3 microtubules.

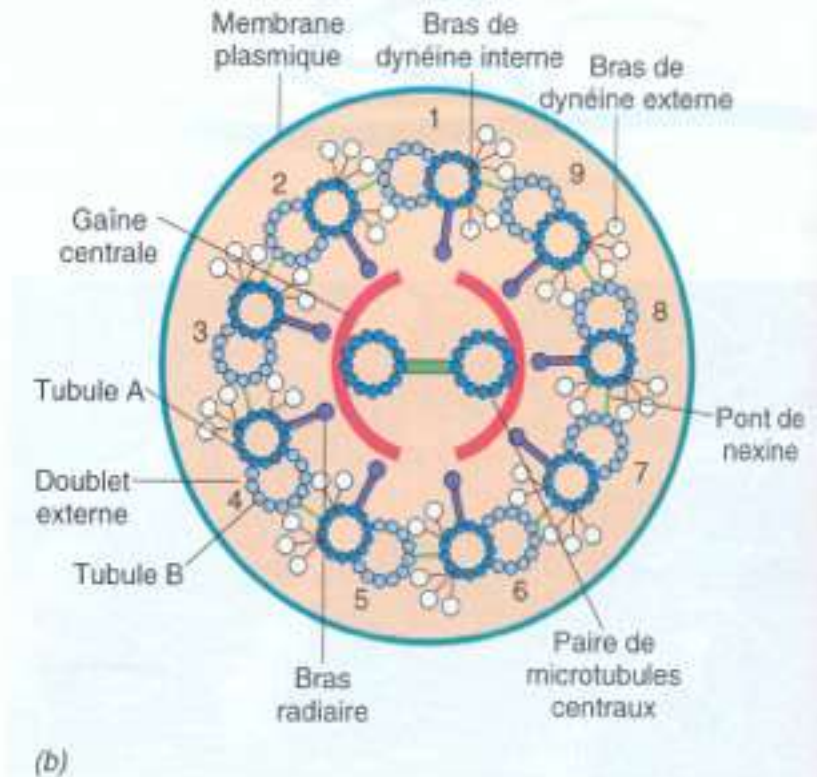
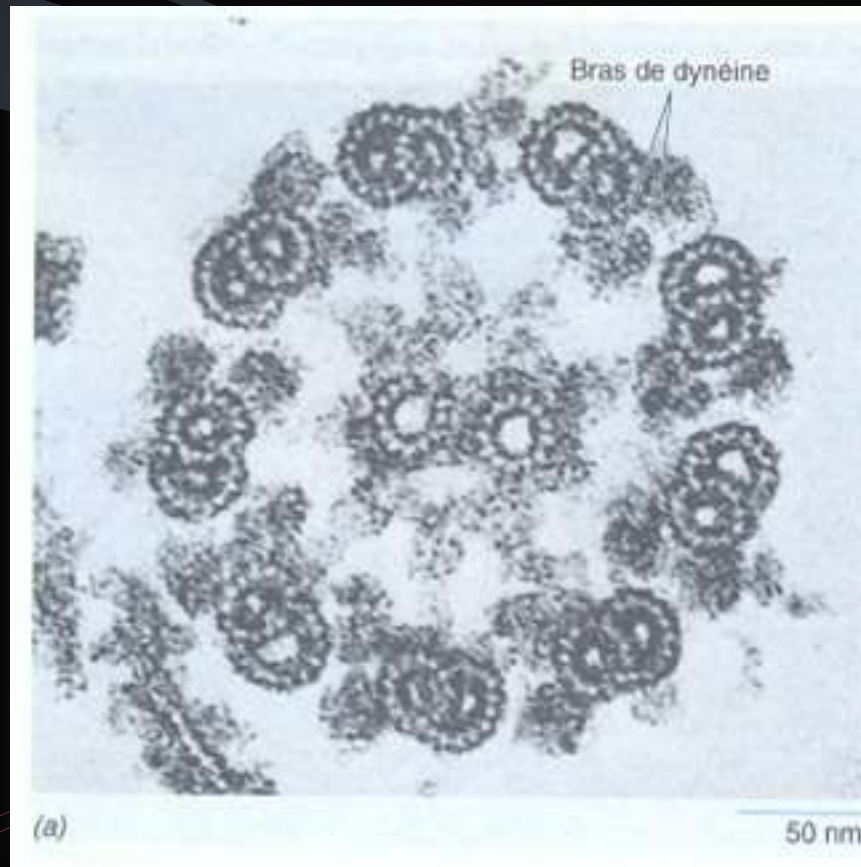
Un système central et des rayons associent les différents groupes de microtubules.

De plus, les microtubules internes sont reliés aux microtubules externes d'un autre groupe.



II-4-5- Les cils et les flagelles

Au microscope électronique les **cils** et les **flagelles** eucaryotes apparaissent, en coupe transversale sous forme d'un arrangement caractéristique de type **9+2**, c'est à dire **9 doublets** de microtubules formant un cercle autour de **2 microtubules** centraux.



Le **centre organisateur** (corpuscule basal), est un arrangement **9+0**.

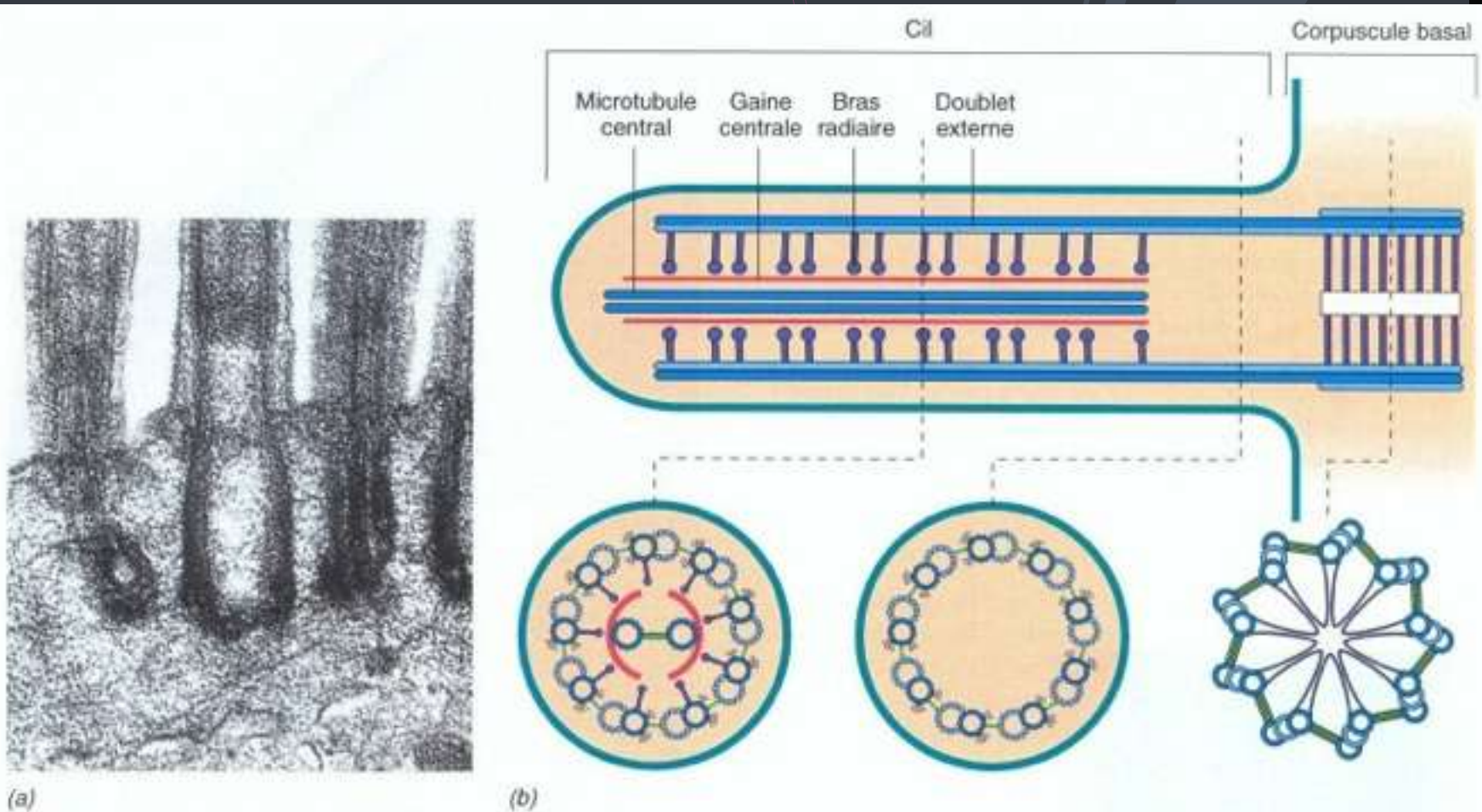
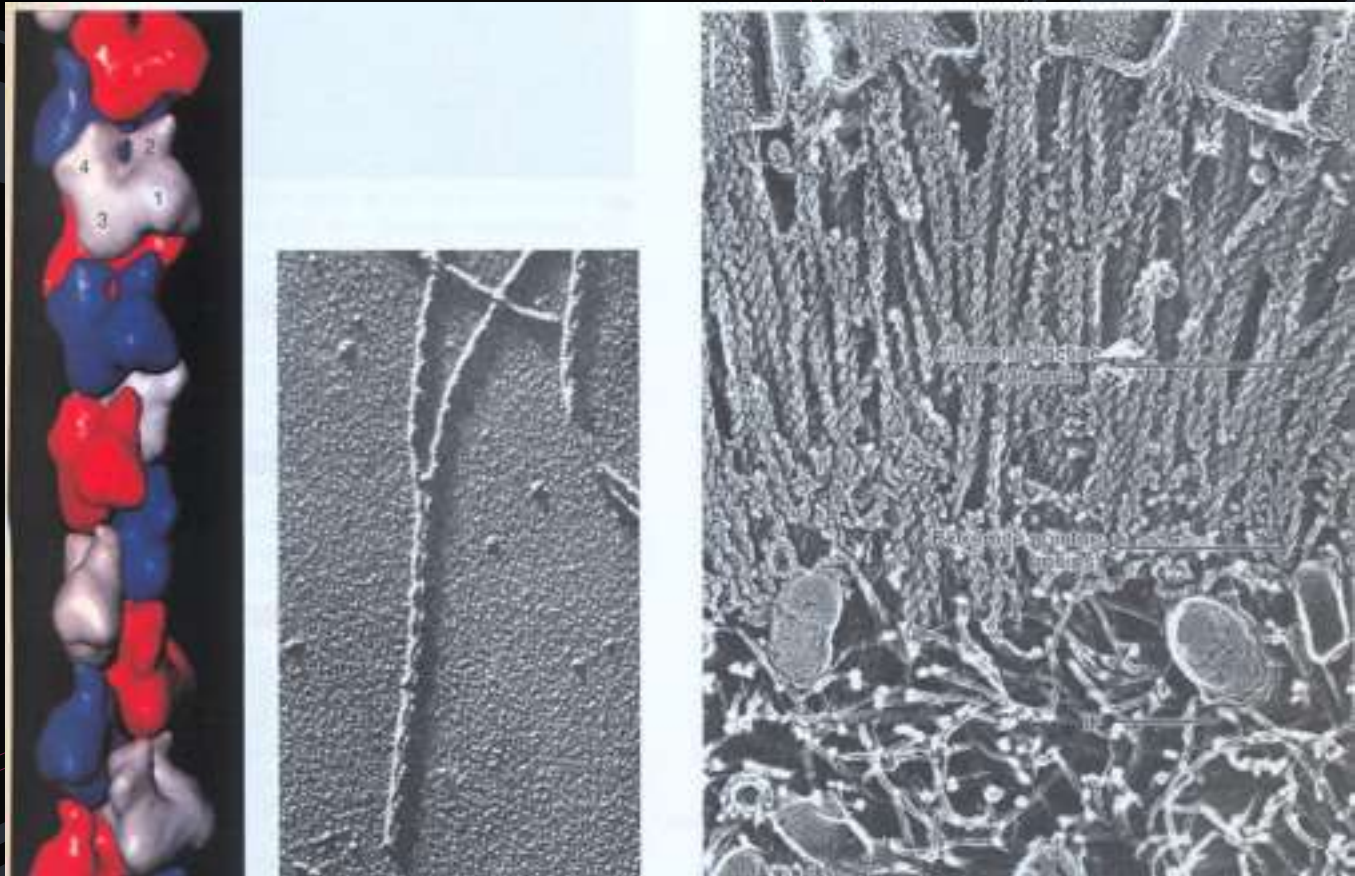


Figure 9.33 Corpuscules de base et axonèmes de cils ou de flagelles. (a) Micrographie électronique d'une coupe longitudinale dans les corps de base de plusieurs flagelles à la surface apicale de cellules épithéliales d'un oviducte de lapin. (b) Schéma illustrant les

relations structurales entre les microtubules du corps de base et de l'axonème d'un cil ou d'un flagelle (a : *Dû à l'obligeance de R. G. W. Anderson*).

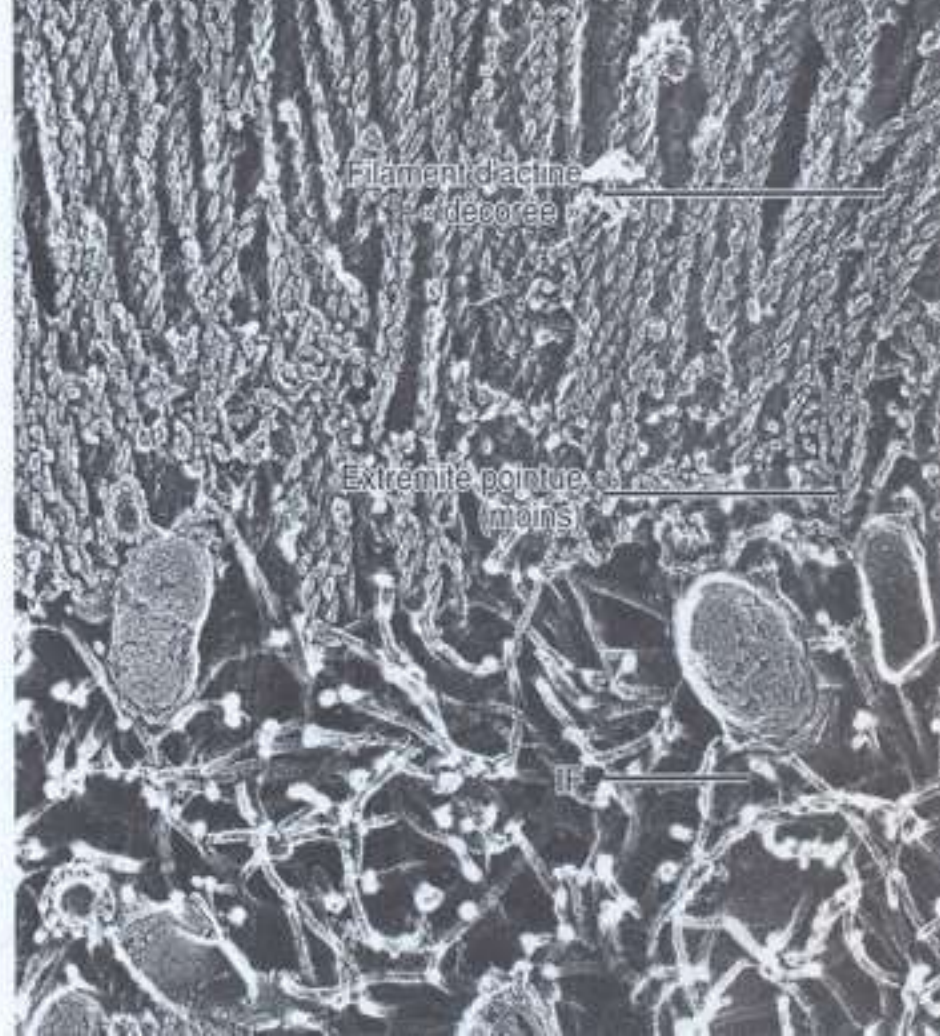
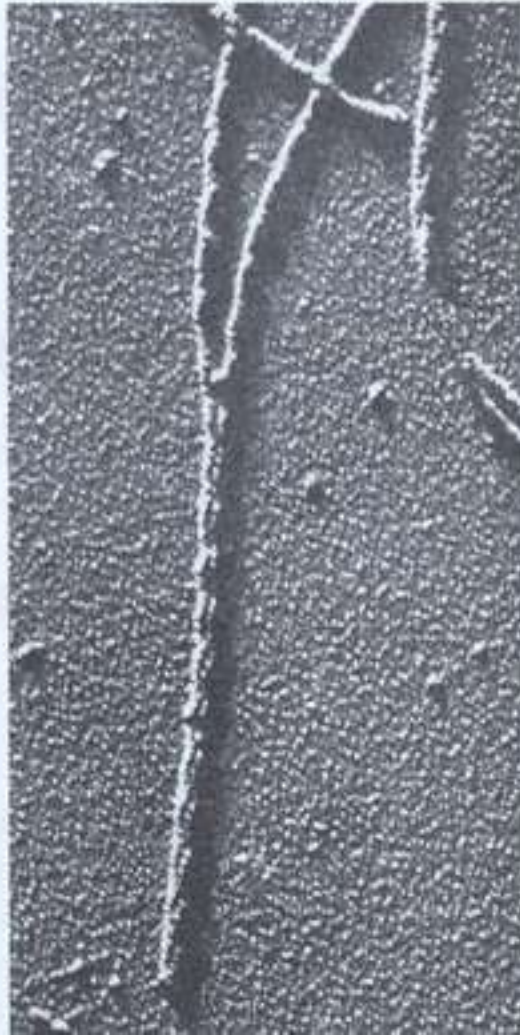
II-1-2- Les microfilaments

Les microfilaments sont de minces structures pleines, formées de sous-unités globuleuses d'une protéine, l'actine. Ils sont appelés aussi de ce fait, filaments d'actine et sont retrouvés en grande quantité dans les fibres musculaires.



Ils ont un diamètre d'environ 8 nm, et leur longueur peut atteindre 17 μm .

En présence d'ATP, les monomères d'actine se polymérisent pour former un filament rigide composé de deux brins enroulés l'un autour de l'autre en double hélice.



Les microfilaments sont de deux types :

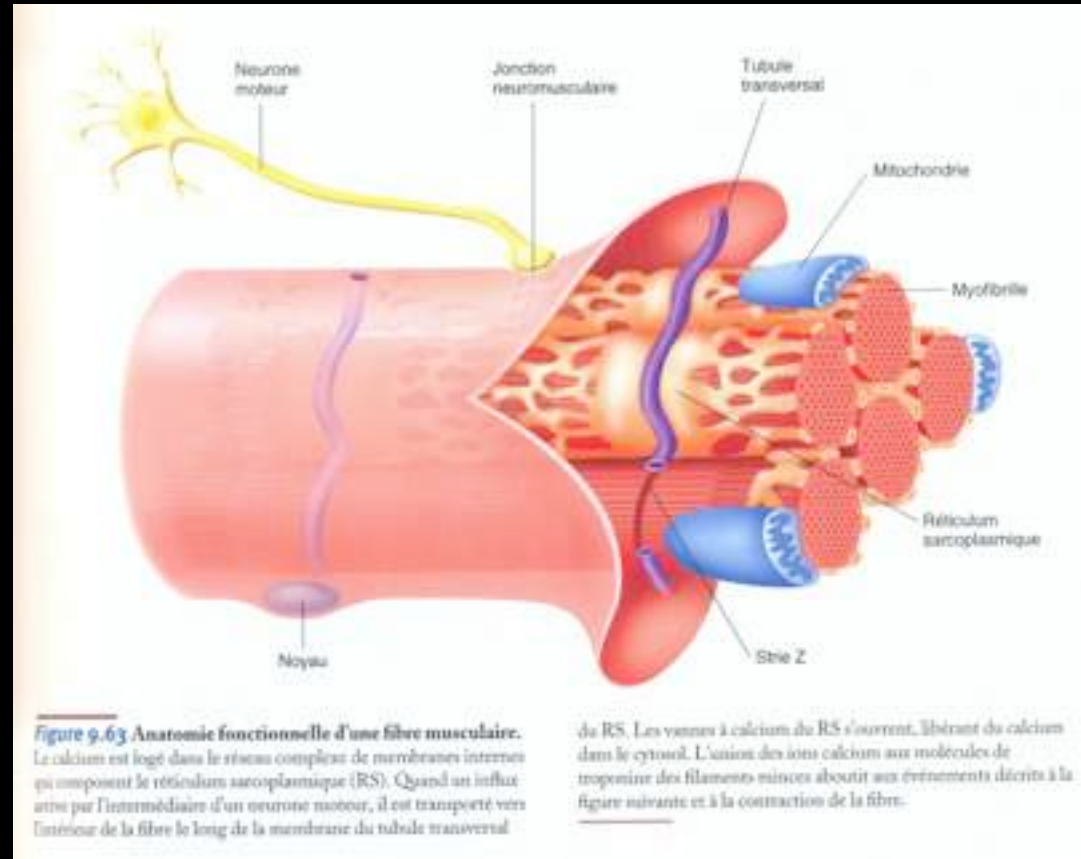
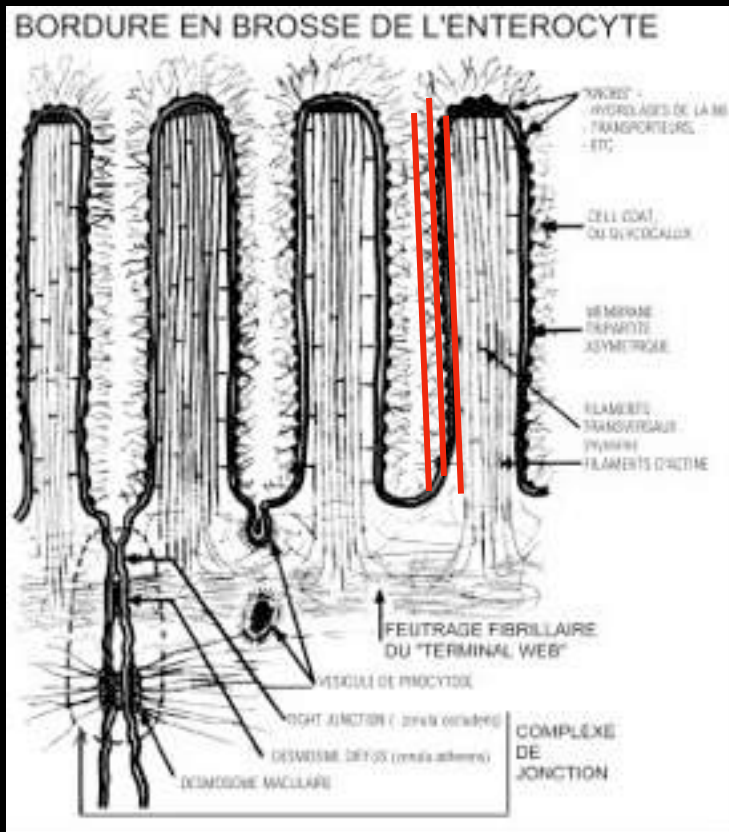
Les tonofilaments

(Kératines constituant de fins filaments)

(rigidité)

Les myofilaments

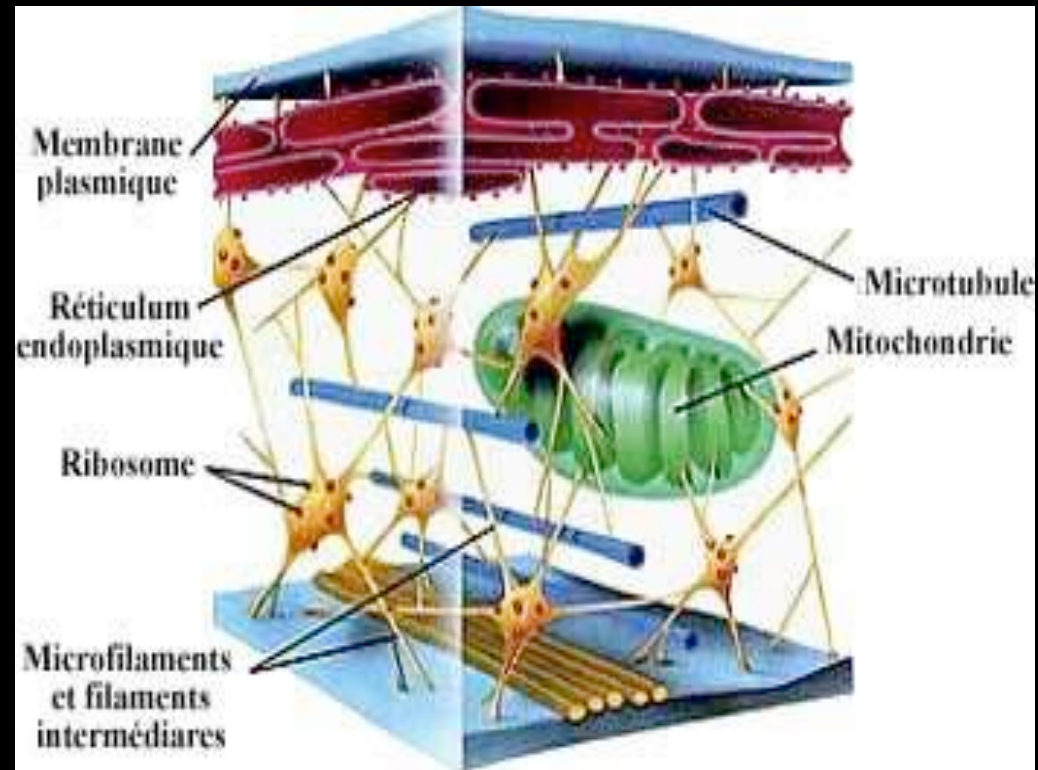
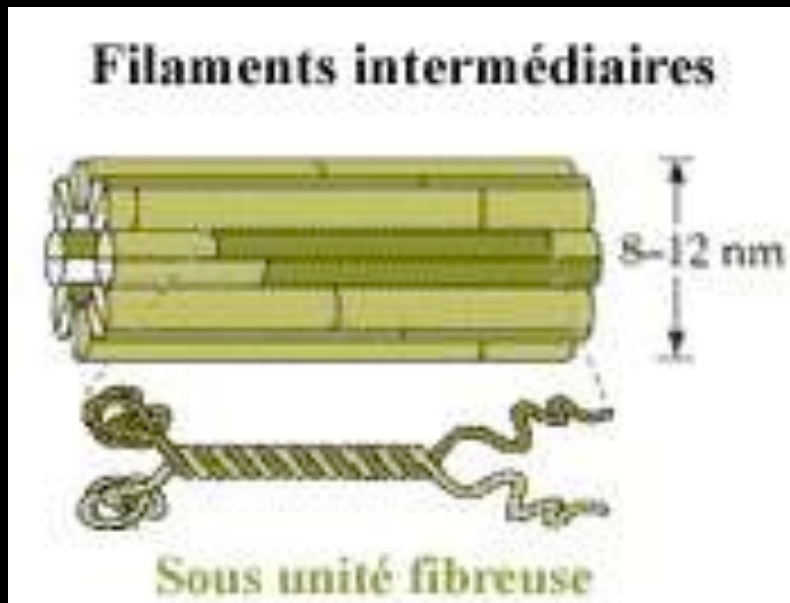
(faisceaux de molécules de myosine ou d'actine)



II-1-3- Les filaments intermédiaires

= polymères stables formés de **protéines fibrillaires** assemblées de façon hélicoïdale.

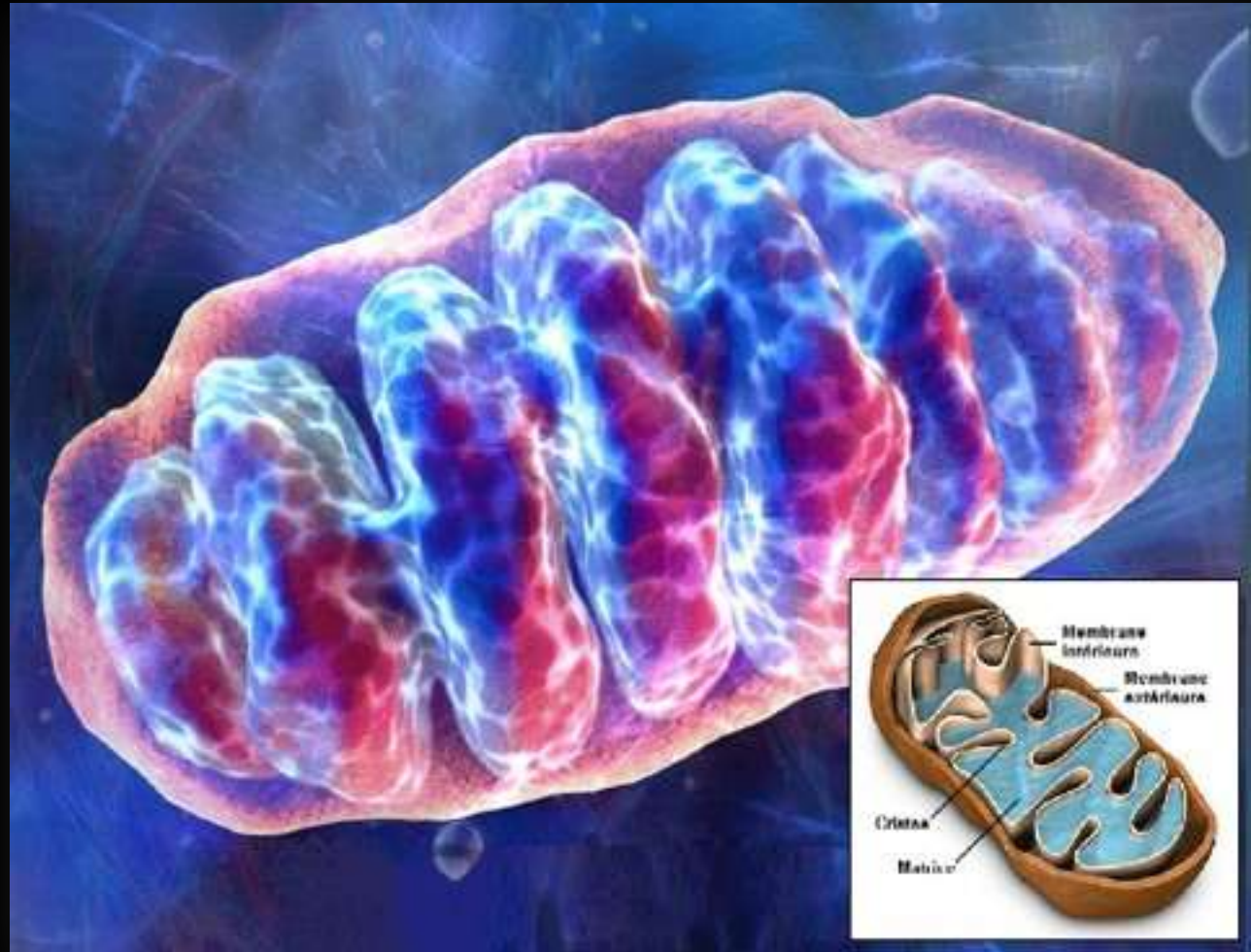
- Taille intermédiaire entre les **microfilaments** d'actine et les **microtubules**.



Maintien de la forme cellulaire & ancrage des **organites**.

LA MITOCHONDRIE

Chapitre IV



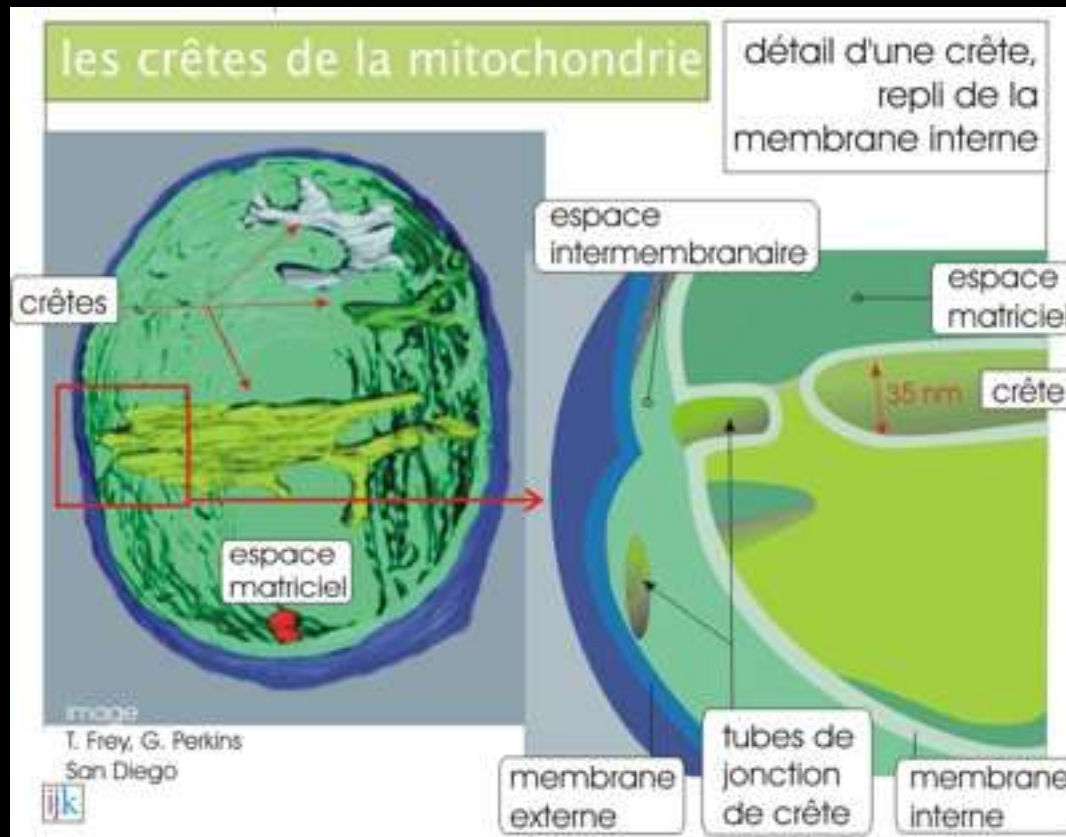
Pr. Boutaina BELQAT

I- Définition

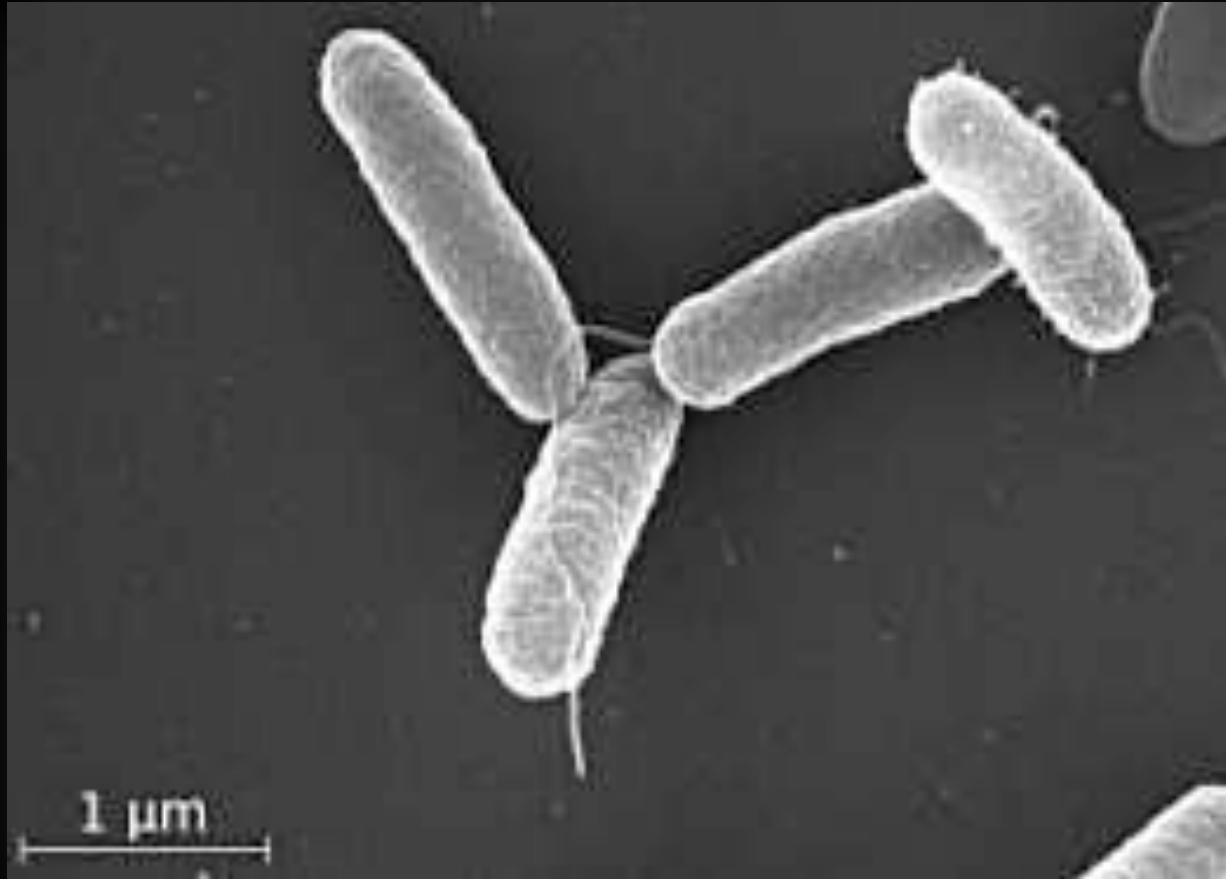
- = organites présents dans toute les cellules aérobies.
L'ensemble = le chondriome.
- sont limitées par une enveloppe constituée de deux membranes,
- contiennent de l'ADN.
- Elles mettent en réserve, sous forme d'ATP, l'énergie libérée par l'oxydation enzymatique des molécules nutritives.
- Elles interviennent dans le **stockage** de l'**énergie** et dans son **transport** sur les lieux où la cellule en a besoin.

II- Structure et morphologie en microscopie optique

- Les mitochondries peuvent être aisément isolées par ultracentrifugation, purifiées et fractionnées en leurs différents constituants qui peuvent ainsi être analysés.



II-1- Forme



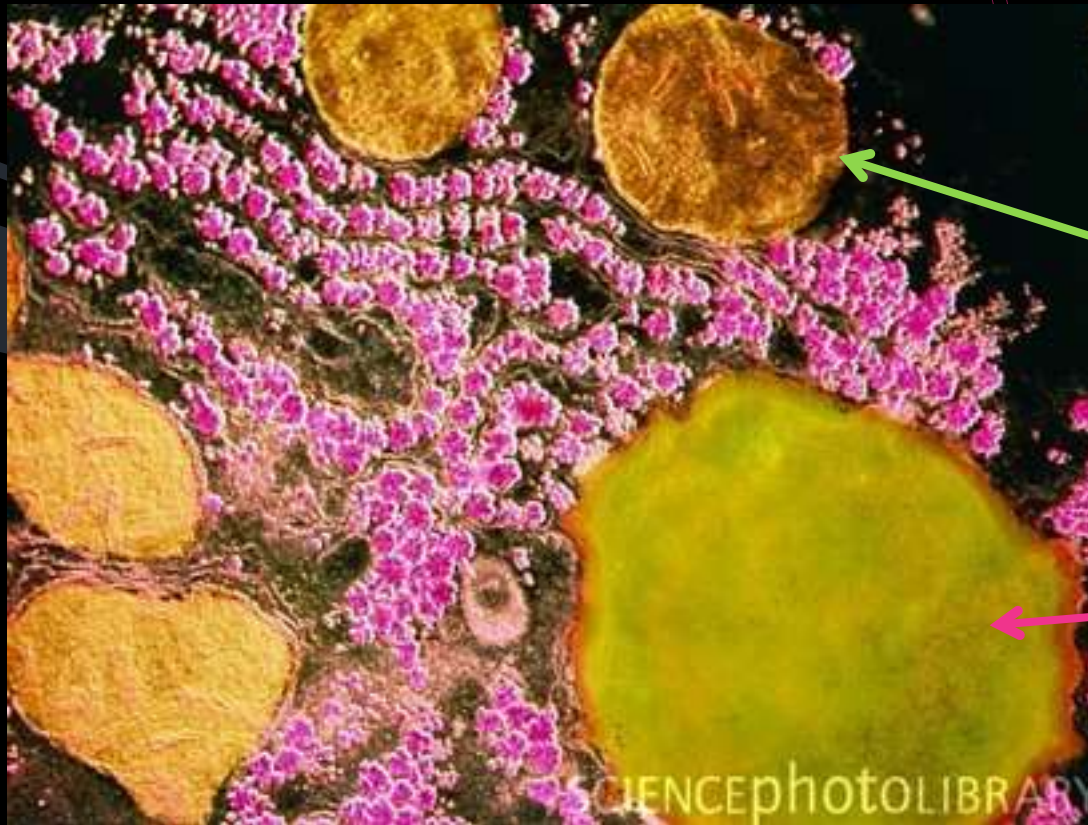
Photographie en microscopie photonique montrant la forme en bâtonnets des mitochondries (coloration au vert Janus).

II-2- Répartition des mitochondries dans la cellule



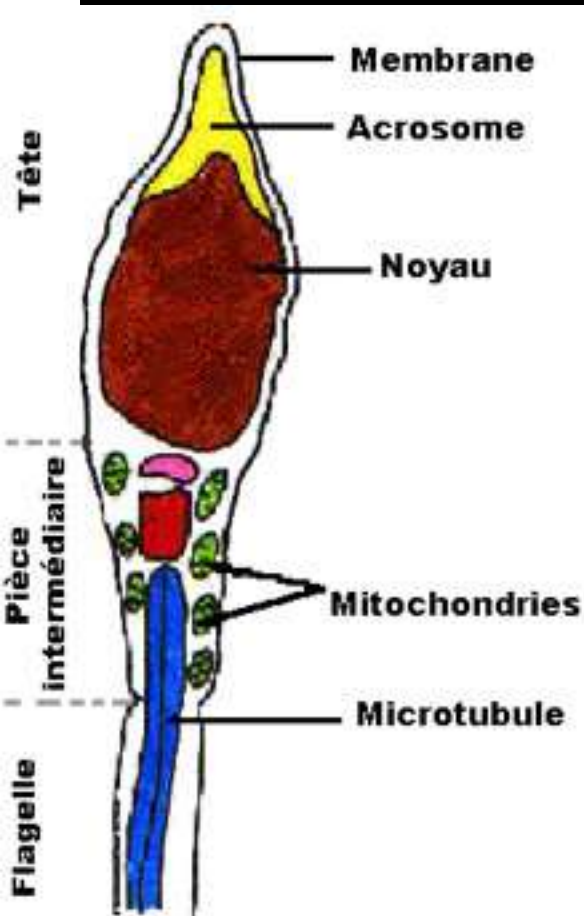
- Les mitochondries se répartissent, bien souvent, uniformément dans le cytosol.
- Mais, c'est la fonction de la cellule qui conditionne leur localisation ;
- Elle dépend des besoins énergétiques locaux.

II-2-1- Selon la localisation des substrats à oxyder



Au cours du jeûne, les glucides diminuent et les mitochondries font appel aux lipides, oxydés alors activement et dégradés pour fournir des radicaux acétyles utilisés dans le cycle de Krebs.^{11/08/12}

II-2-2- Selon les besoins en ATP de certaines régions d'une cellule



- La fonction de la cellule conditionne leur localisation ; elle dépend des besoins énergétiques locaux :
 - dans le muscle, elles se placent en regard des myofibrilles.
 - dans le spermatozoïde humain, elles se placent au niveau de la pièce intermédiaire.

III- Ultrastructure



membrane
interne

membrane
externe

crête
mitochondriale

Matrice



Micrographies en microscopie électronique montrant en (a) l'ultrastructure de la paroi des mitochondries et en (b) une petite portion d'une crête mitochondriale portant à la surface interne de ses membranes des particules élémentaires

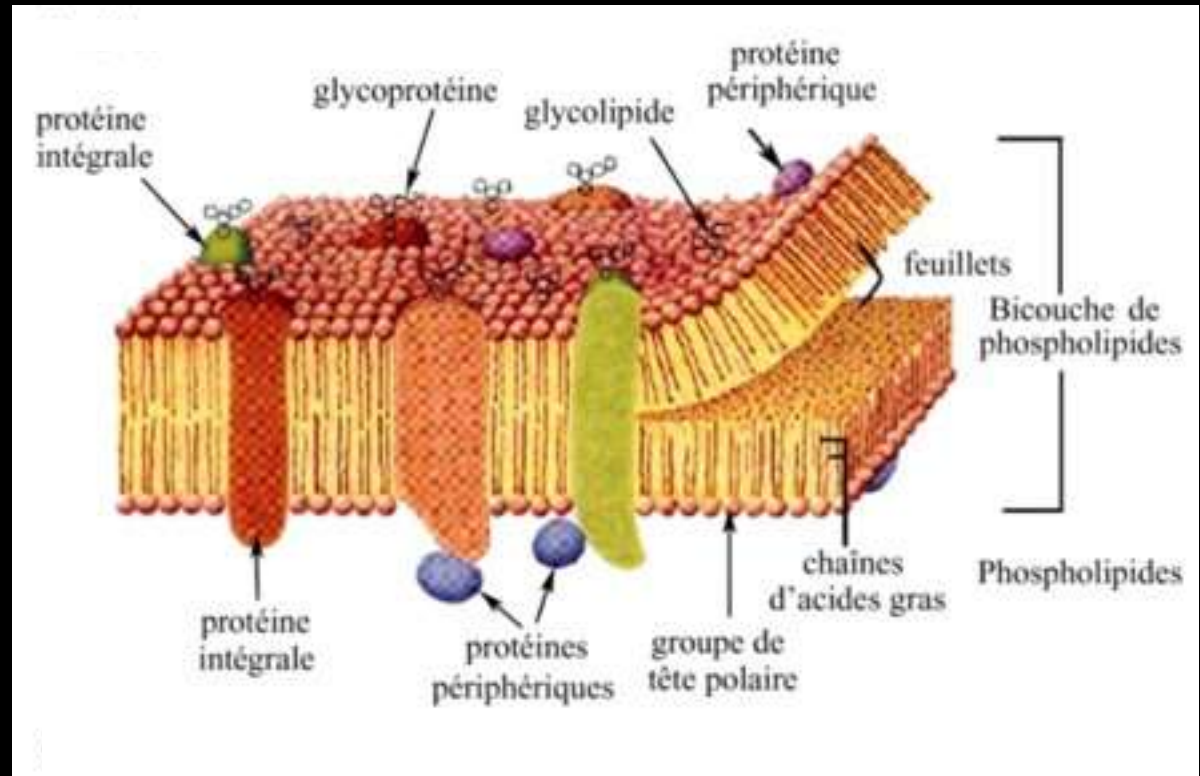
III- Ultrastructure des membranes mitochondriales

Membrane externe:

- 60% de protéines
- 40% de lipides

Membrane interne:

- 80% de protéines
- 20% de lipides



IV-2-2- Les protéines

- **Protéines de transport** (perméabilité très sélective);
- Protéines intervenant dans les **réactions d'oxydation** de la chaîne respiratoire;
- Complexe enzymatique, **l'ATP-synthétase** assurant, à partir de l'ADP, la fabrication d'ATP dans la matrice mitochondriale.

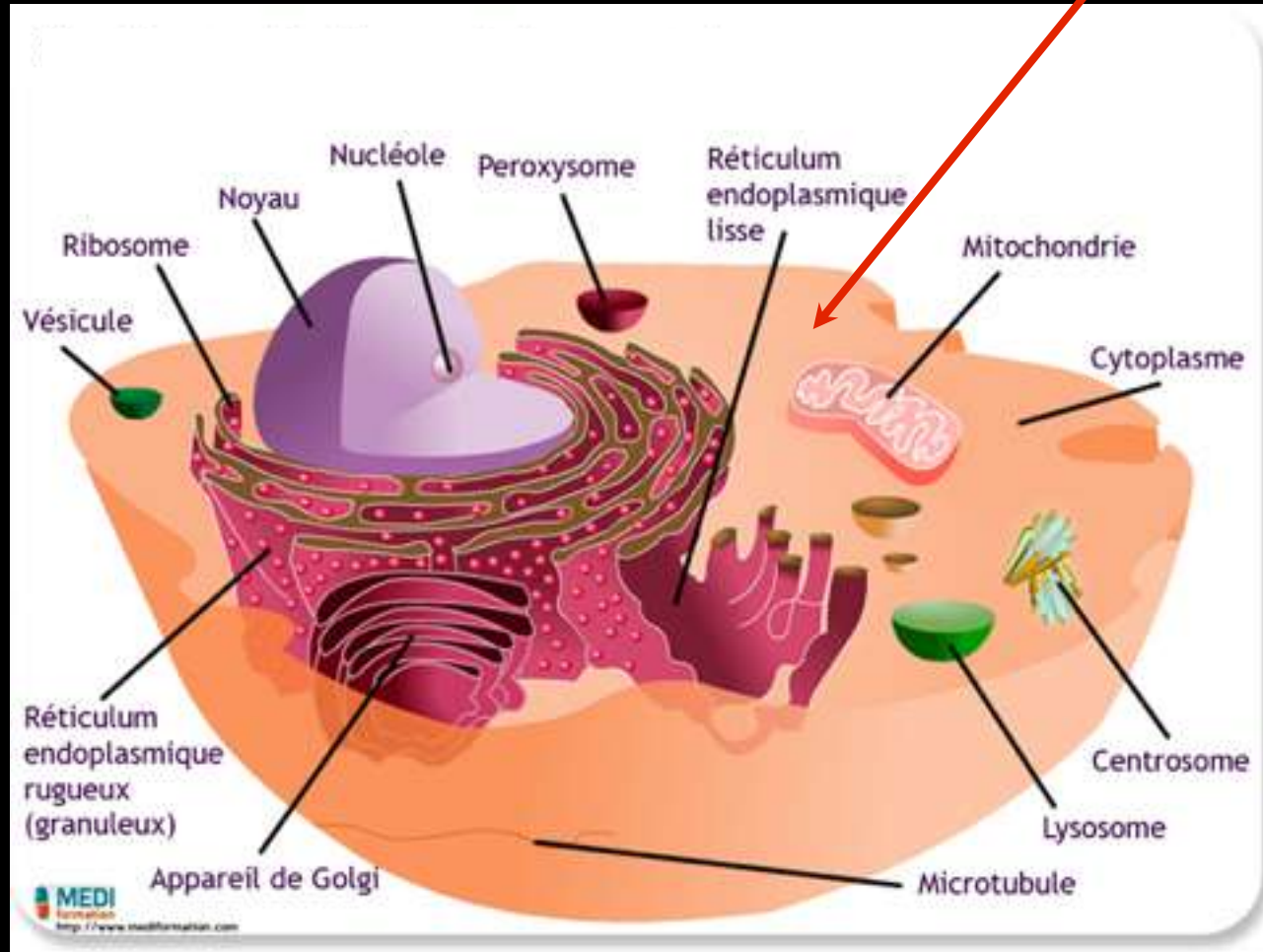
IV-4- La matrice mitochondriale

- La matrice est constituée d'une substance fondamentale finement granuleuse. Elle renferme :
 - des molécules d'ADN et d'ARN ;
 - des mitoribosomes ;
 - toutes les enzymes impliquées dans la réplication, la transcription et la traduction de l'ADN mitochondrial ;
 - de gros granules riches en cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) ;
 - toutes les enzymes impliquées dans le **cycle de Krebs** et la **β -oxydation**.

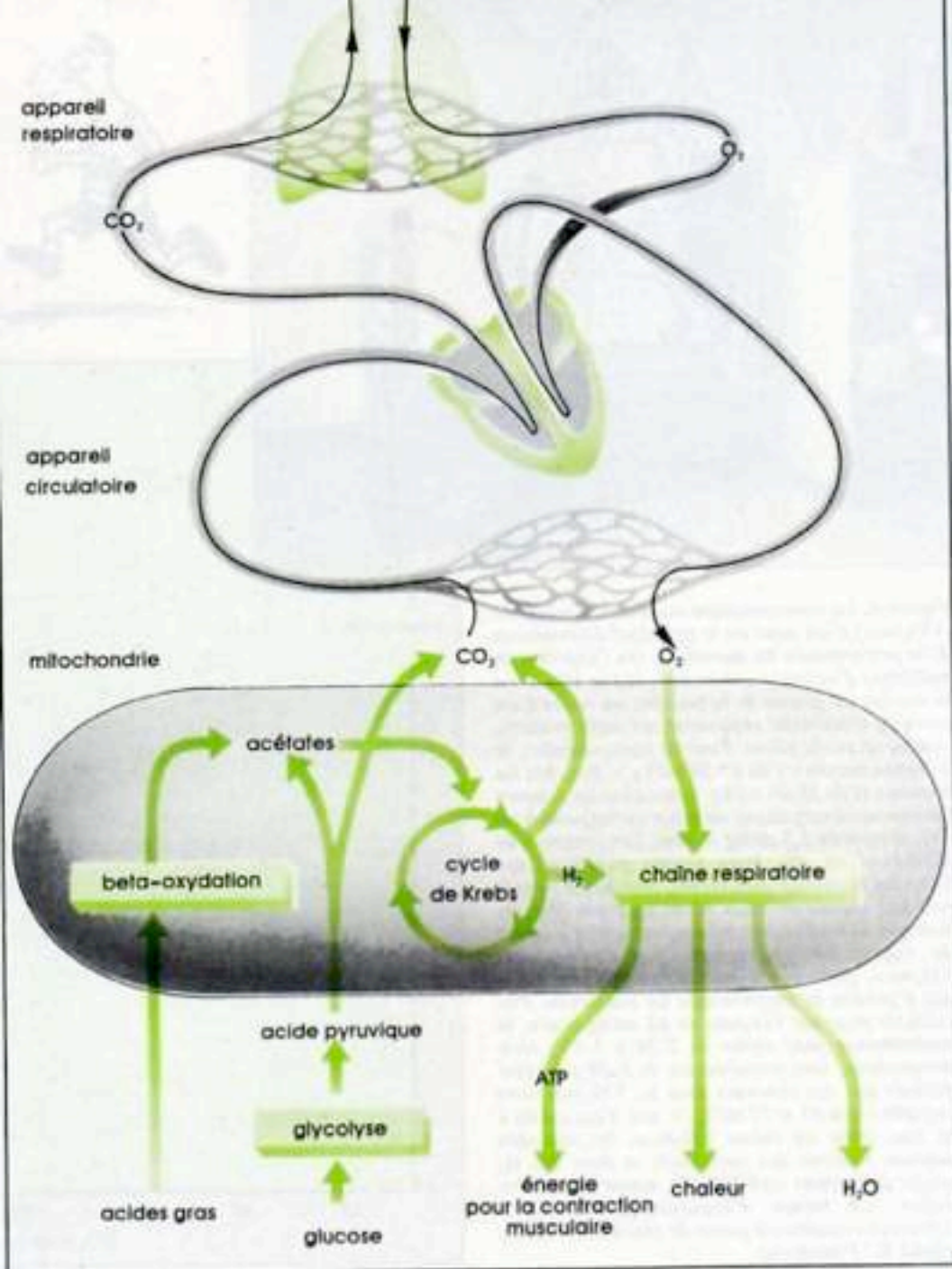
V- Activités physiologiques

- Les cellules vivantes ont besoin d'un approvisionnement constant en intermédiaires énergétiques, comme l'ATP, pour accomplir leurs activités consommatrices.
- Les organismes peuvent fabriquer l'ATP en dégradant des molécules organiques fournies par l'alimentation (protéines, glucides, lipides).

Les premières étapes de leur dégradation ont lieu dans le cytosol



- Les protides sont transformés en acides aminés (catabolisme) dont une certaine partie donne du pyruvate .
- les glucides, dont la majorité fournissent, par glycolyse, du pyruvate.
- Les lipides, constituent une réserve importante d'énergie. Par le processus de la lipolyse, ils sont dégradés en acides gras qui pénètrent dans les mitochondries.
- La dégradation des nutriments se réalise grâce au mécanisme de la **Respiration**.



Inspiré par les **poumons**, l' **O_2** passe dans la **circulation sanguine** qui le délivre aux **cellules** de l'organisme, principalement celles des muscles lors d'un exercice.

Par le même circuit, le **CO_2** produit par les cellules en activité est rejeté dans l'**atmosphère**.

A l'intérieur des cellules, l' **O_2** est acheminé dans la **mitochondrie**.

Là, les **acétates** fournis par les **acides gras** ou le **glucose** sont décarboxilés et déshydrogénés dans le **cycle de krebs**.

Les **H_2** libérés alimentent la **chaîne respiratoire** et sont acceptés par l' **O_2** pour former de l' **H_2O** , en libérant de l'**ATP**.

L'**ATP** est utilisé par le muscle pour se contracter.

Ces différentes voies métaboliques sont dites **aérobies**.

V-1- Etapes de la respiration

- La dégradation des nutriments se réalise grâce au mécanisme de la **respiration**. La respiration est le processus par lequel la cellule produit de l'énergie nécessaire pour ses activités.
- Au cours de ce mécanisme, qui a lieu dans la mitochondrie, il y a absorption d'**oxygène** et dégagement du **dioxyde de carbone**.
- La respiration se déroule en trois étapes :
 - **La glycolyse**
 - **Le cycle de Krebs ou cycle de l'acide tricarboxylique**
 - **La chaîne de transport d'électrons ou chaîne respiratoire**

V-1-1- La Glycolyse

La glycolyse ne nécessite pas d'oxygène.

Au cours de ce processus, on assiste à des réactions d'oxydoréduction au cours desquelles un **accepteur d'électrons** (coenzyme NAD) est réduit :

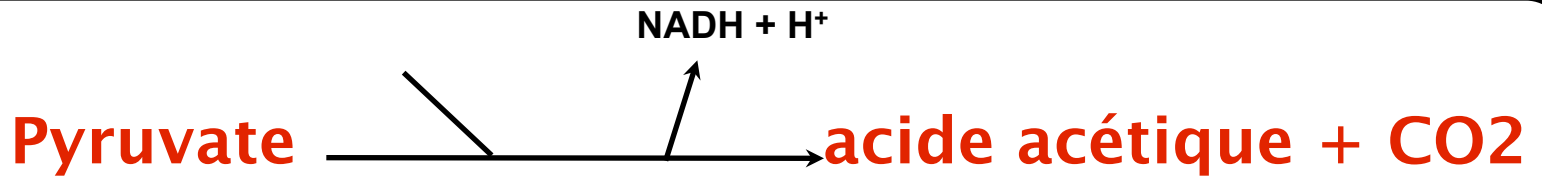


et à la synthèse d'ATP par phosphorylation de l'ADP qui produit 4 molécules d'ATP, mais en nécessite 2

- Les produits nets de la glycolyse sont donc :
- 2 ATP (phosphorylation au niveau du substrat)
- 2 NADH + 2 H⁺
- 2 pyruvates

V-1-2- Oxydation des substances au cours du cycle de Krebs

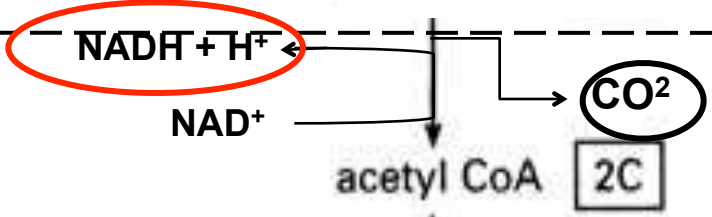
- En présence d'**oxygène**, le **pyruvate** rentre dans la mitochondrie pour être oxydé et relâcher l'énergie au cours du cycle de Krebs.
- Avant que le cycle de Krebs ne commence, il se produit une étape intermédiaire durant laquelle :
 - Un groupement carboxyle est arraché au pyruvate et relâché dans le cytosol sous forme de **CO₂**.



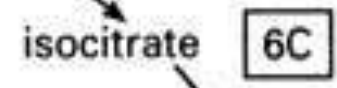
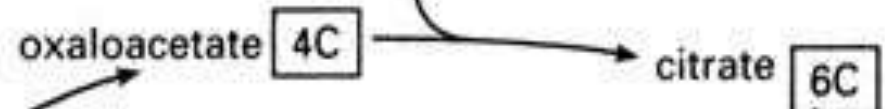
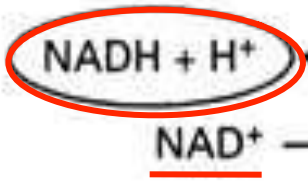
- Il se forme l'**acide acétique**, après la réduction du **NAD⁺** en **NADH + H⁺**.
- Le radical **acétyl** de l'**acide acétique** se lie avec le **coenzyme A (Co A)** pour produire l'**acétyl-CoA**.

Acide pyruvique 3C

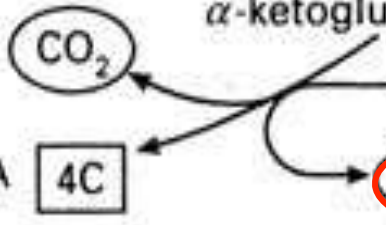
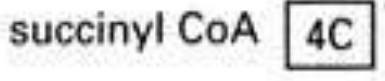
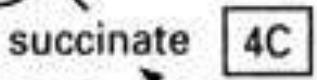
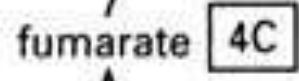
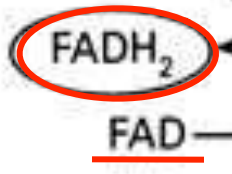
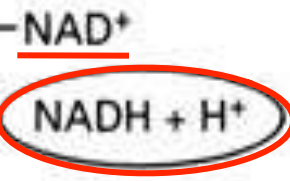
Cytosol



Matrice (mitochondrie)



Cycle de Krebs



Le cycle de Krebs (matrice)

- = séquence organisée de réactions enzymatiques avec, l'**acide oxaloacétique**, comme substrat **initial** et produit **terminal** :
- L'**acétyl-coenzyme A** cède le radical acétyl **CH₃CO** à l'**acide oxaloacétique** (4C) pour produire le **citrate** (6C).
- Le **citrate** est **progressivement décomposé** jusqu'à l'**acide oxaloacétique**.
- Ces oxydations transforment **chaque** radical acétyl en 2 molécules de CO₂, 8 atomes d'hydrogènes, et 8 électrons.

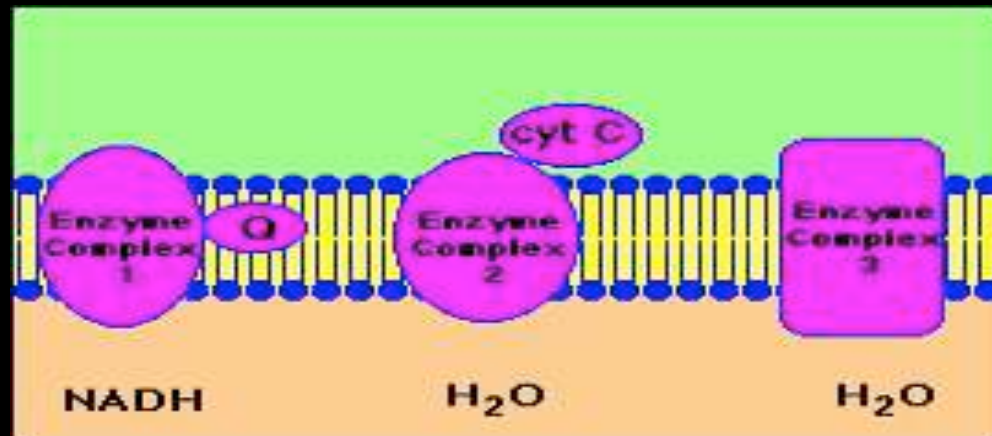


Les ions hydrogène arrachés aux substrats sont repris par des accepteurs, des **coenzymes**:

le **NAD** (nicotinamide – adénine – dinucléotide)

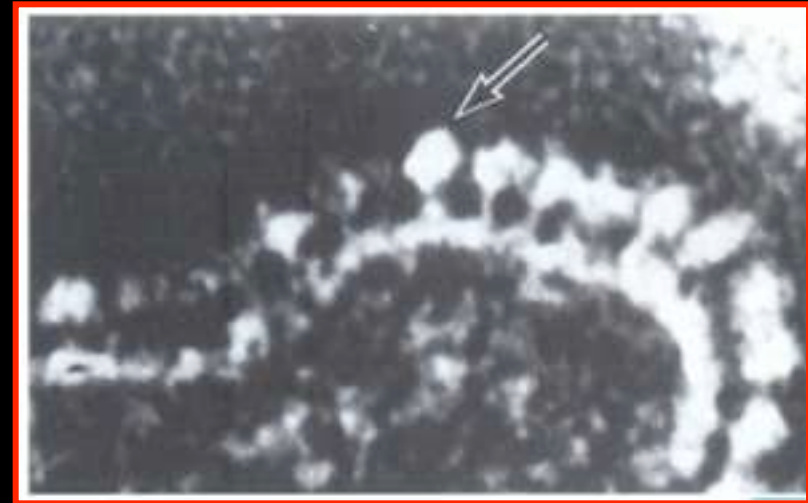


Le **FAD** (flavine – adénine – dinucléotide)



- En termes énergétiques, c'est le résultat le plus important du cycle parce que ces coenzymes réduites servent à produire, au cours de la **phosphorylation oxydative**, la plus grande partie de l'énergie dérivée de la molécule de glucose initiale.

Cycle de Krebs



2 tours du cycle pour chaque molécule de glucose

- Pour chaque tour du cycle :
- **2 carbones** entrent sous la forme réduite de l'**acétyl-CoA** ;
- **2 carbones** ressortent complètement oxydés sous la forme de **CO₂** ;
- **3 molécules de NAD⁺** sont réduites en **NADH + H⁺** et **1 molécule de FAD** est réduite en **FADH₂** ;
- **1 molécule d'ATP** est produite par la **phosphorylation au niveau du substrat.**

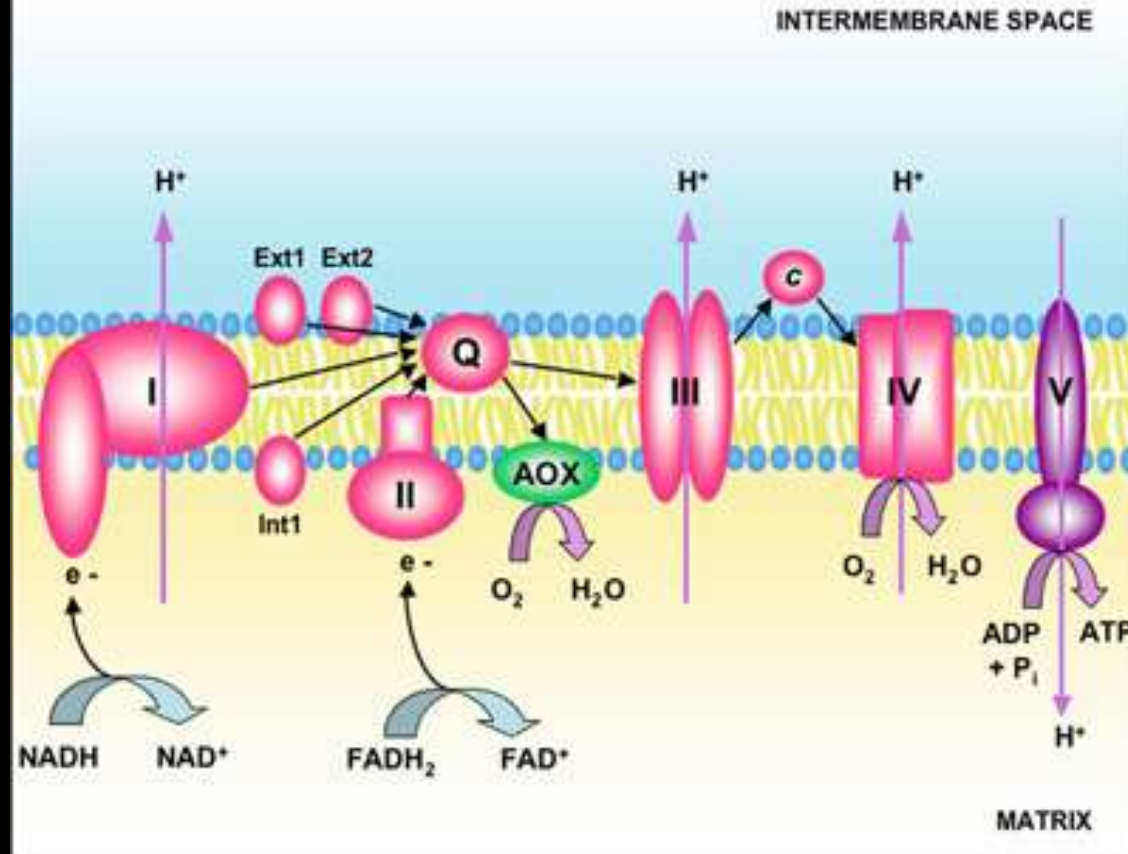
Le bilan énergétique du cycle de Krebs

- pour les 2 molécules de pyruvates:
 - 6 NADH + 6 H⁺
 - 2 FADH₂ + 2 H⁺
 - 2 ATP

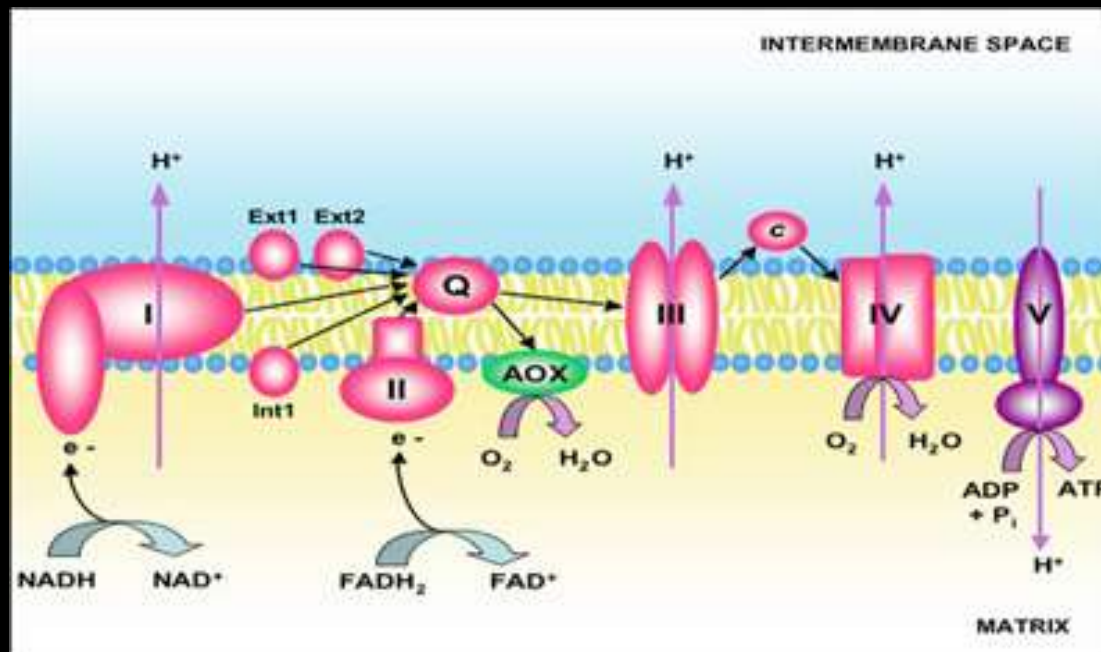
V-1-3- Chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative

- Les coenzymes réduites (NADH, FADH₂) cèdent leurs électrons à haute énergie à des transporteurs localisés dans la membrane interne de la mitochondrie.
- L'ensemble de ces transporteurs, assemblés dans l'ordre exact de leurs interactions, constitue la **chaîne respiratoire**.

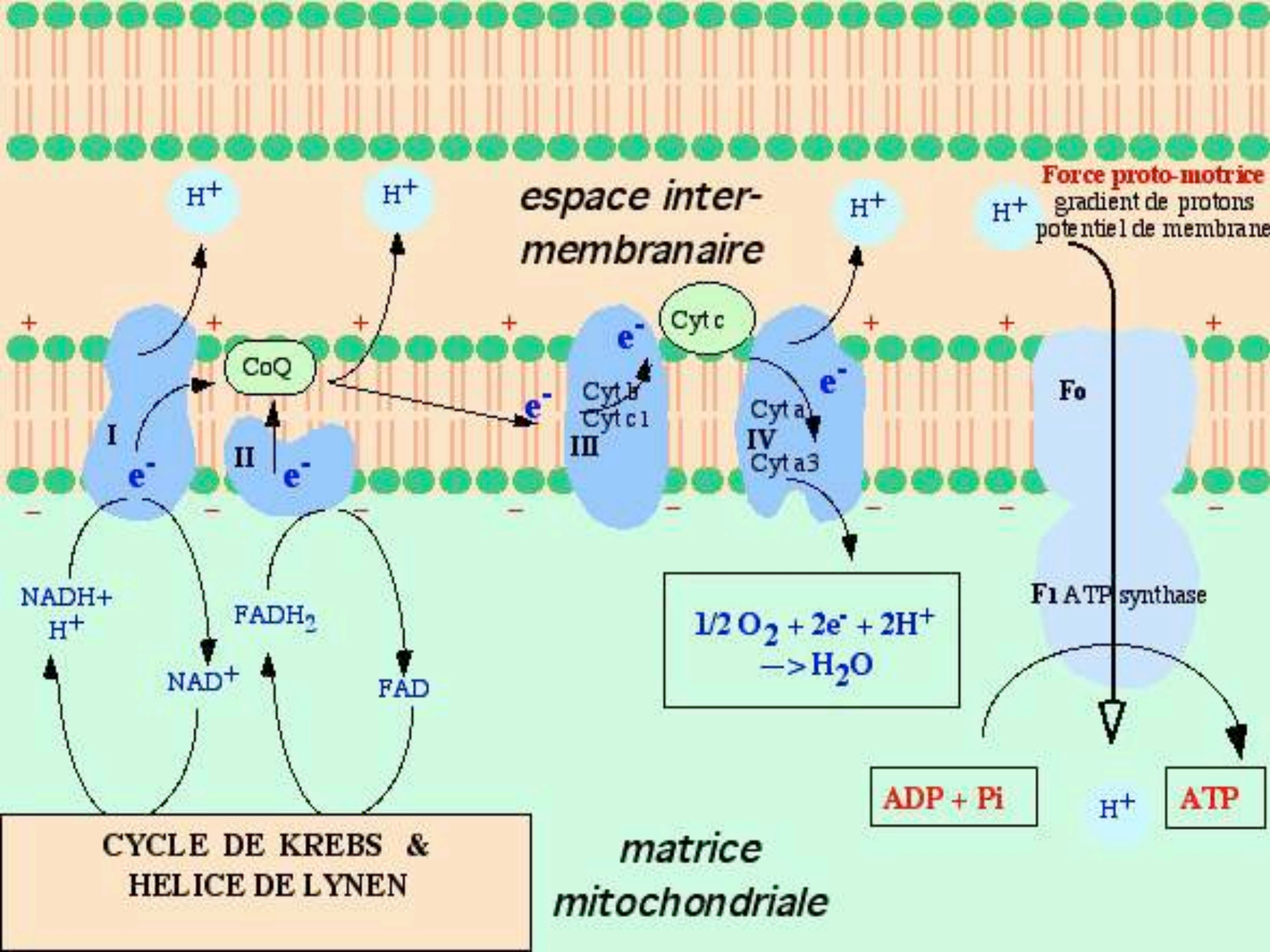
- La **chaîne de transport des électrons** est une suite de molécules fixées sur la **membrane interne de la mitochondrie** qui sont disposées dans un **ordre décroissant d'affinité pour les électrons**.
- Les **électrons** provenant des coenzymes réduits **se déplacent** le long de la membrane sur la chaîne de transport.
- Les électrons, en se déplaçant, **font sortir des protons** (H^+) dans l'espace intermembranaire de la **mitochondrie**.
- L'accumulation de protons fait fonctionner l'**ATP synthétase** (une pompe à protons) qui utilise le reflux de protons pour fabriquer de l'ATP.



- Le **NADH** passe ses électrons à la flavoprotéine (FMN) qui les passe à une série de molécules (y compris les cytochromes).
- Le **FADH2** donne ses électrons à la chaîne à un niveau d'énergie **plus bas** que le NADH.
- Les **électrons** sont transmis jusqu'à l'**accepteur final** qui est l'**oxygène** moléculaire, qui accepte en même temps des protons **2H⁺** pour former de l'**eau** (molécule stable).
- Ainsi, c'est pendant cette étape que l'oxygène est consommé.

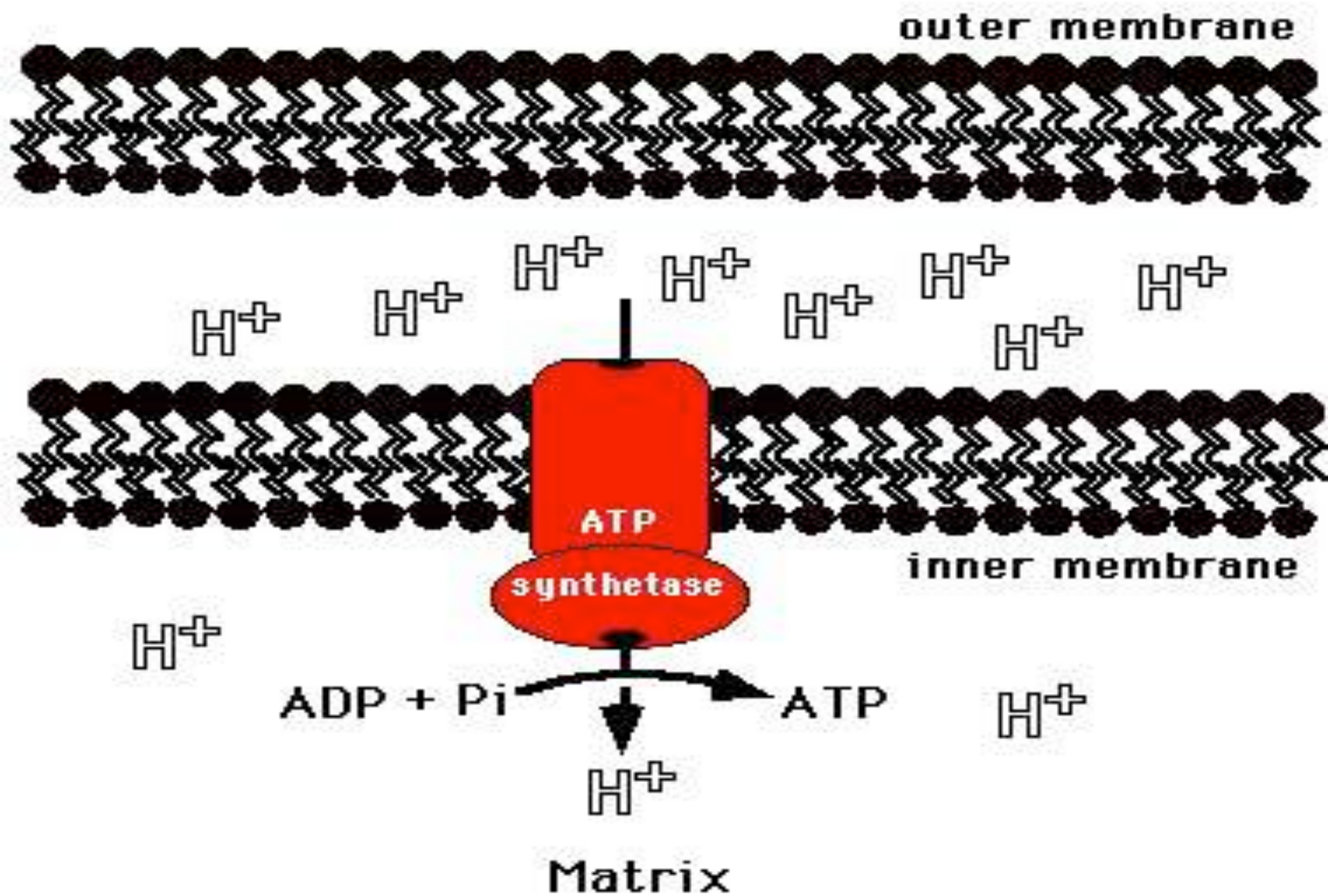


- Le passage des électrons d'un transporteur à un autre, libère de **l'énergie** à chaque étape.
- Cette **énergie** permet d'assurer le **transport** des protons **H⁺** depuis la **matrice** jusqu'à la **face externe** de la **membrane interne**. Le **pH** de la matrice s'abaisse.
- La **membrane interne** devient **électronégative** sur la face **matricielle** et **électropositive** sur la face en rapport avec la **chambre externe**.

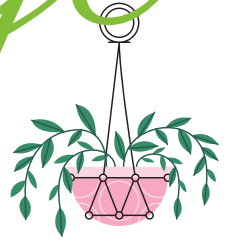


Phosphorylation oxydative

Le flux d'hydrogène active l'enzyme ATP synthétase qui fabrique de l'ATP à partir d'ADP et de phosphore inorganique.



Bon courage



LIENS UTILES 🙌

Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

