

Le système nerveux : les neurones



1- Introduction

Maintien de l'homéostasie par :

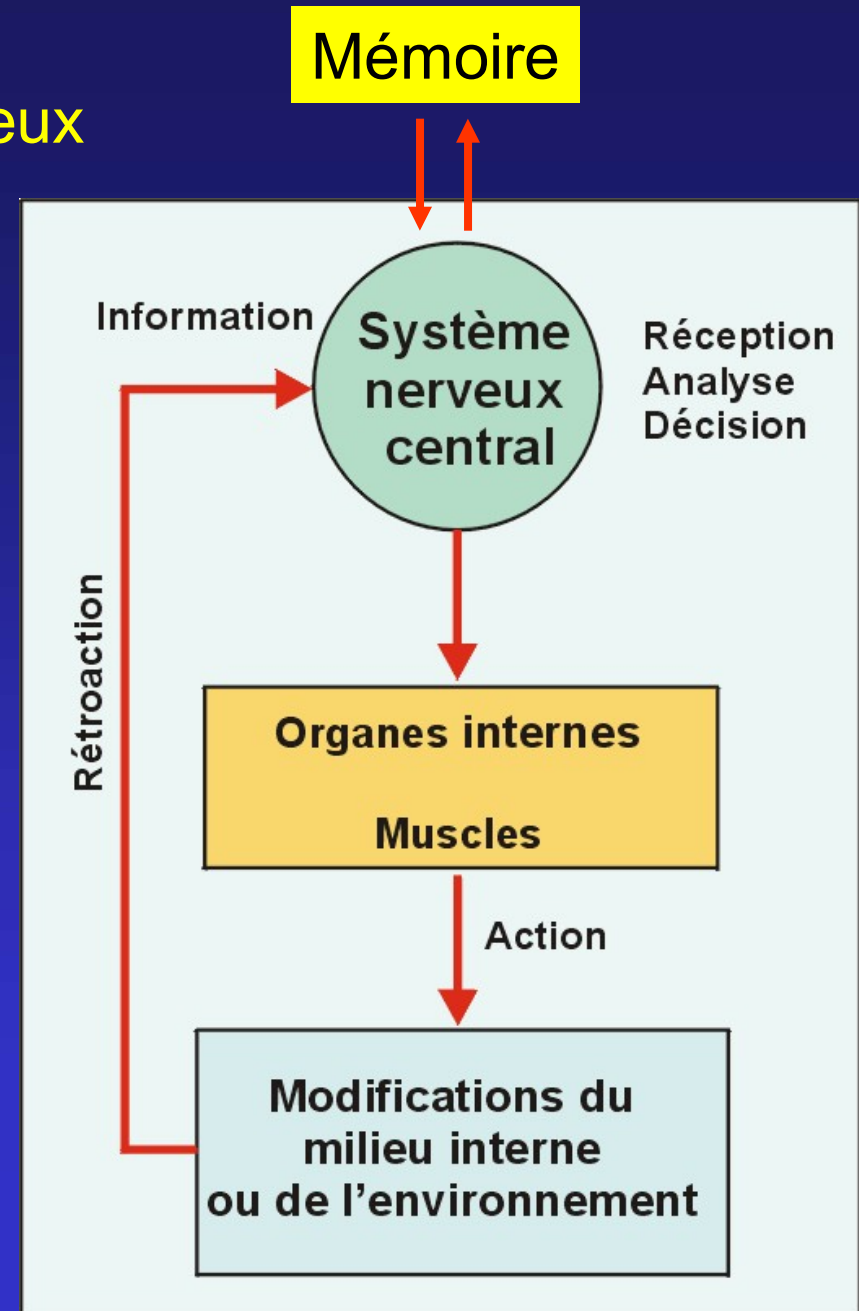
Système endocrinien (hormonal) :

- Sécrétion d'hormones dans le sang
- Action lente, mais soutenue

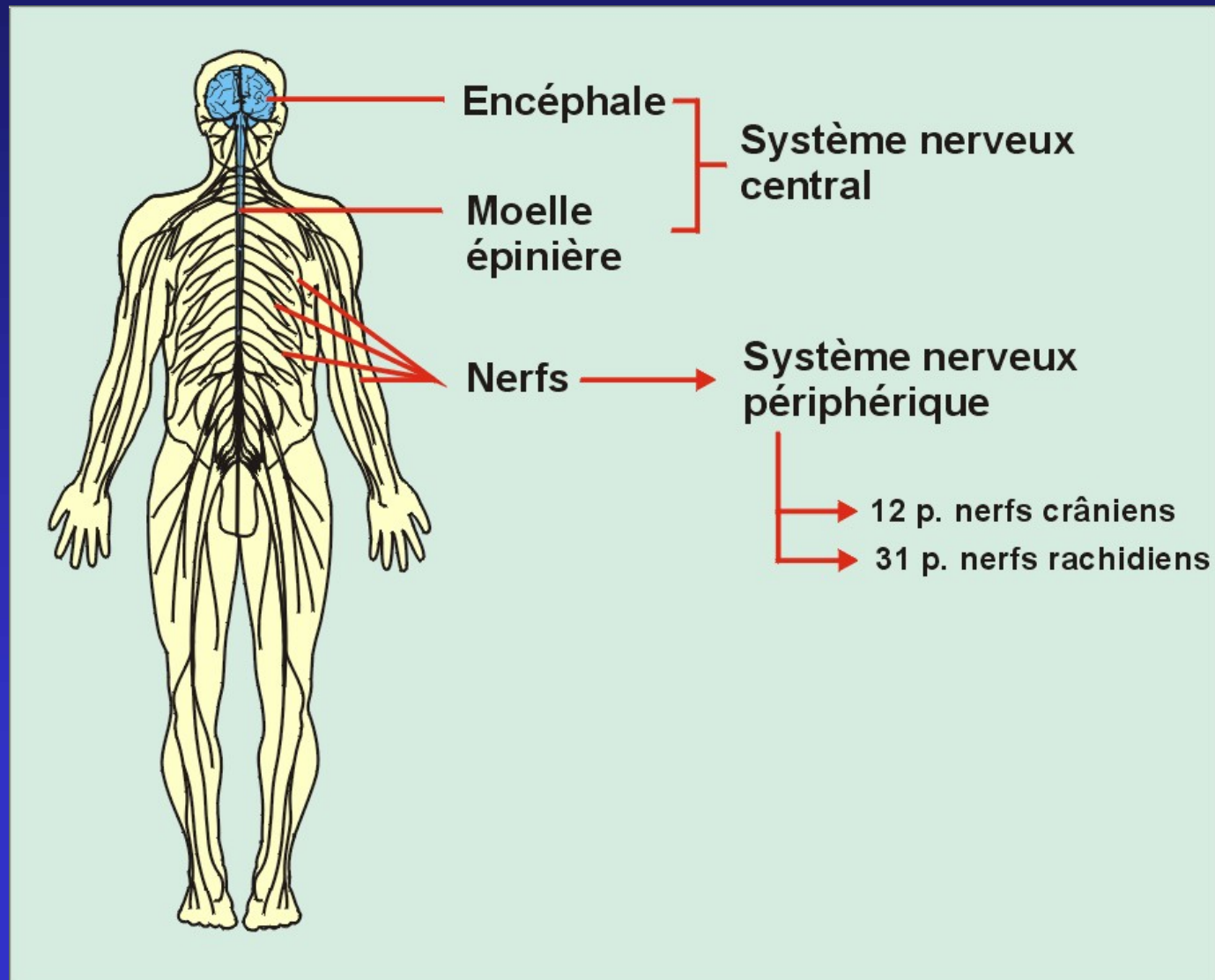
Système nerveux :

- Influx nerveux
- Action rapide, mais brève

Mode d'action du système nerveux



SNC et SNP



Systeme nerveux périphérique (SNP)

```
graph TD; A[SNP] --> B[SN somatique]; A --> C[SN végétatif]; B --> D[Muscles volontaires et organes des sens]; C --> E[SN sympathique]; C --> F[SN parasympathique]; E --> G[Organes végétatifs]; F --> G;
```

The diagram is a hierarchical flowchart on a dark blue background. At the top is a yellow-outlined box labeled 'Systeme nerveux périphérique (SNP)'. A red line descends from this box and splits into two red arrows. The left arrow points to a yellow-outlined box labeled 'SN somatique'. To the left of this box is the text 'Muscles volontaires et organes des sens' in yellow. The right arrow points to a yellow-outlined box labeled 'SN végétatif'. To the right of this box is the text 'Organes végétatifs' in yellow. From the 'SN végétatif' box, a red line descends and splits into two red arrows. The left arrow points to a yellow-outlined box labeled 'SN sympathique'. The right arrow points to a yellow-outlined box labeled 'SN parasympathique'. Both of these boxes have yellow text.

Muscles
volontaires et
organes des
sens

SN somatique

Organes
végétatifs

SN végétatif

SN sympathique

SN parasympathique

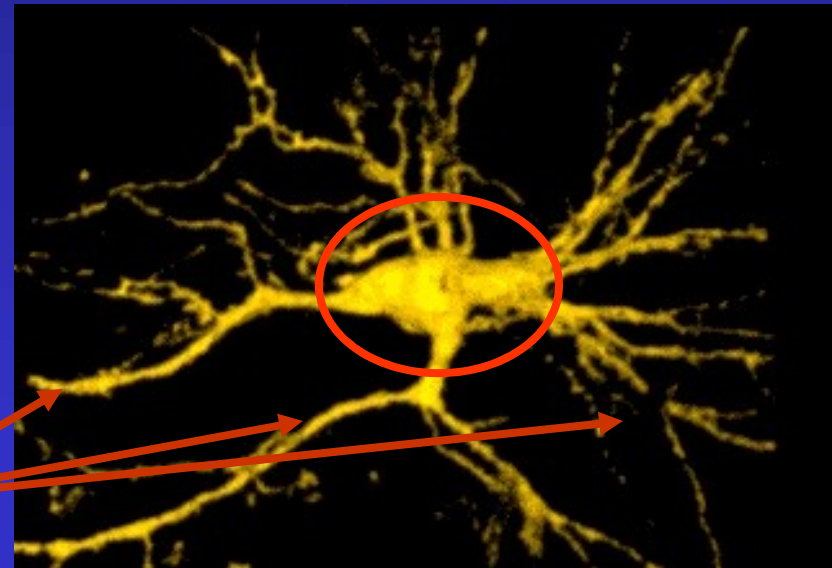
2- Les cellules du système nerveux : les neurones

- Neurones (10%)
- *Cellules gliales* (90%)

Chaque neurone est formé :

- D'un **corps cellulaire**
- De prolongements
fins = **axone et
dendrites**

Prolongements



Dendrites

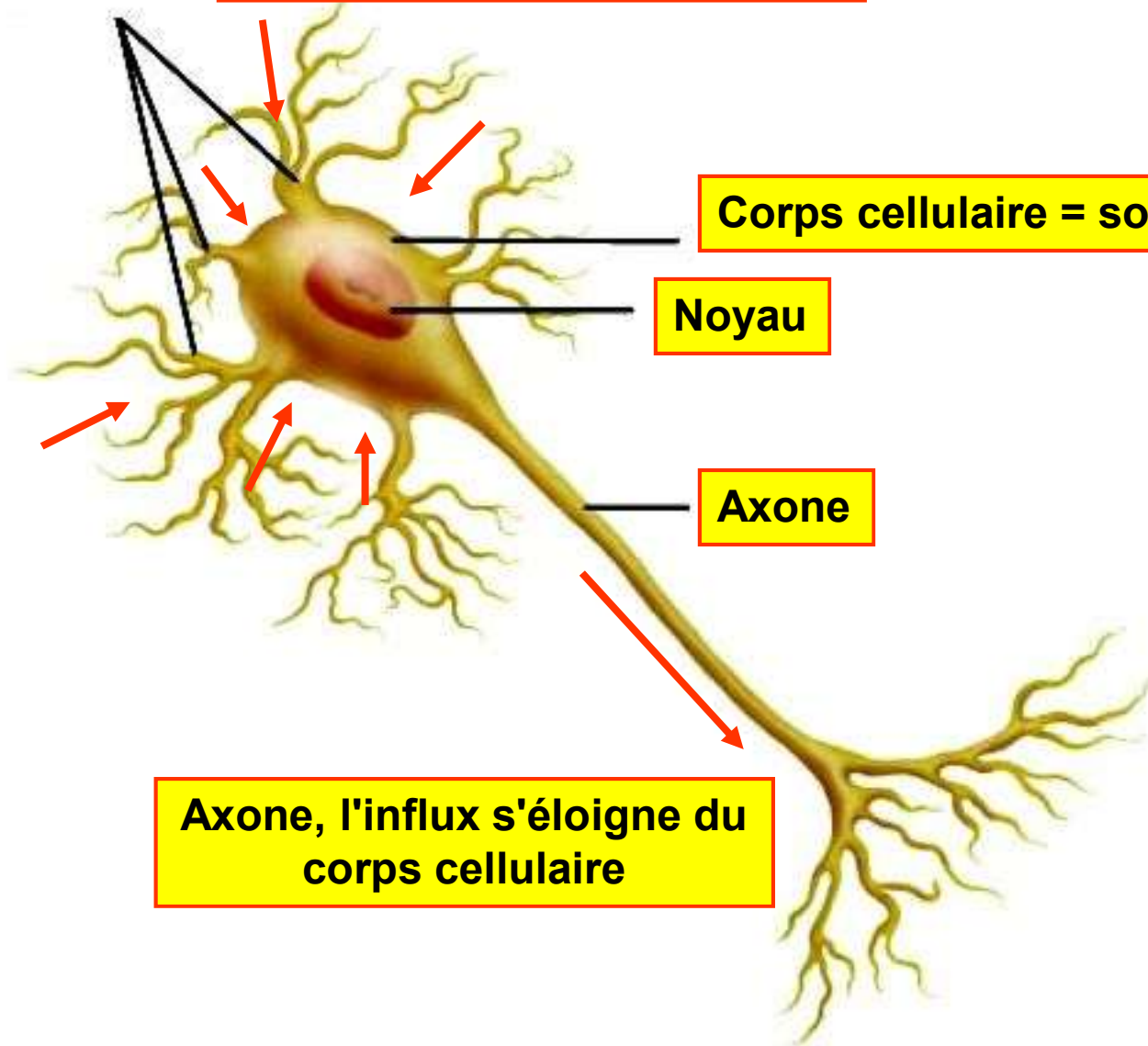
L'influx se dirige vers corps cellulaire

Corps cellulaire = soma

Noyau

Axone

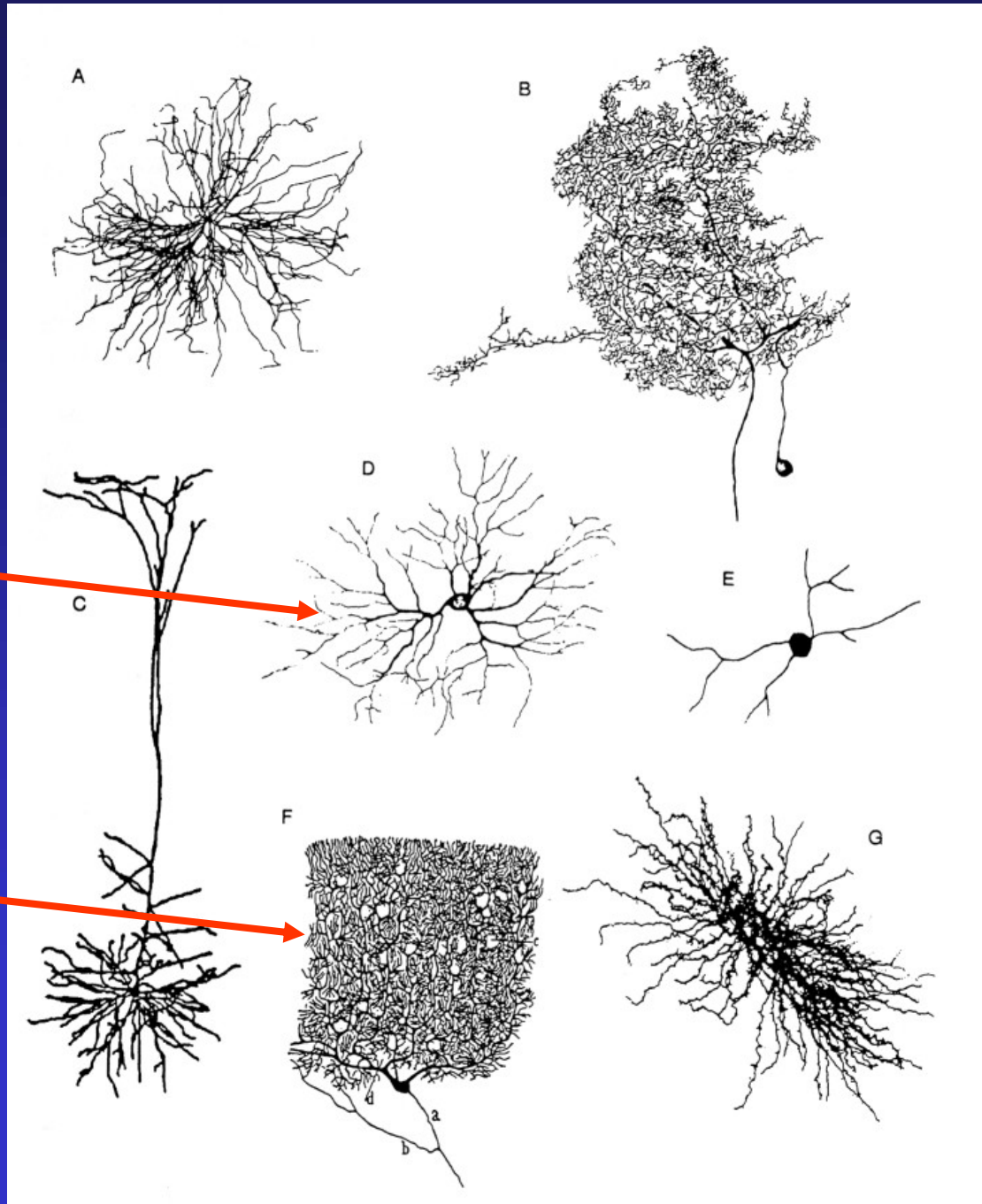
Axone, l'influx s'éloigne du corps cellulaire



Prolongements
peuvent être très
ramifiés

Neurone des
OTG de type 2

Cellule de Purkinje
(cortex cérébral)



Caractéristiques des neurones:

- Cellules excitables
- Longévité ↑
- Consommation d'énergie ↑ ↑ ↑ (le système nerveux correspond à 2% du poids du corps, mais à 20% de la consommation d'énergie)

Rôles des neurones:

- Capteur => transduction en signal électrique
- Intégration des différents signaux électriques
- Conduction => propagation

Quelques éléments constitutifs

Cytosquelette => protéines filamenteuses

↳ microtubules, microfilaments...

- Maintient la forme du neurone
- Permet également le transport des molécules néosynthétisées

↳ antérograde lent 1 à 10 mm/jr

↳ antérograde rapide 50 à 400 mm/jr

} Soma → Axone

↳ rétrograde (feed back) de 50 à 80 mm/jr

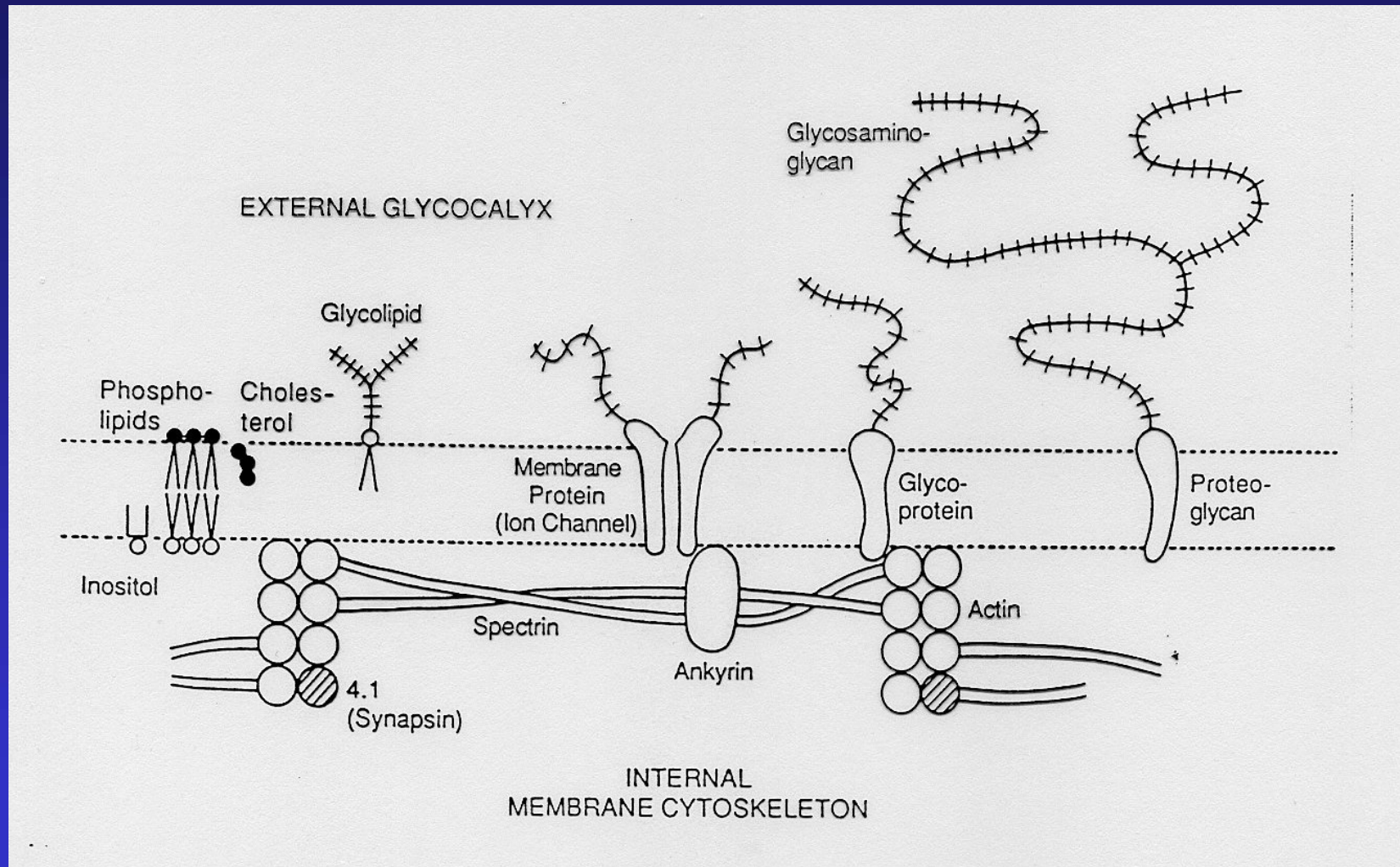
Axone → Soma

Membrane plasmique

↳ bicouche de phospholipides (40%)

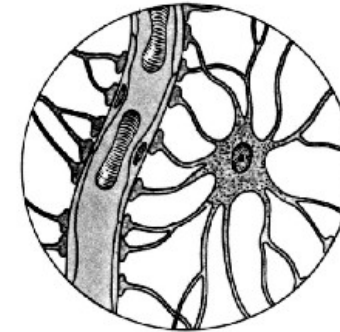
↳ protéines membranaires (60%)

- protéines périphériques (externes – internes)
- protéines intégrées
 - ↳ pompes
 - ↳ canaux ioniques (Na^+ , K^+ , Ca^{++} ...)
 - ↳ récepteurs
 - ↳ enzymes, G-protéines....



Les cellules gliales

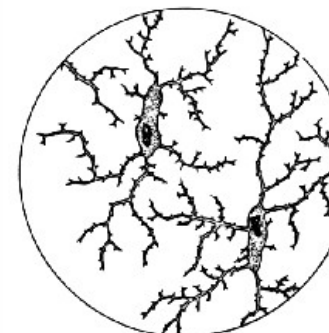
- Soutien (remplissent tous les vides)
- Lien capillaire-neurone
- Contrôle du milieu interne
- Phagocytose des cellules mortes et des corps étrangers
- Gaine de myéline (oligodendrocytes et cellules de Schwann)



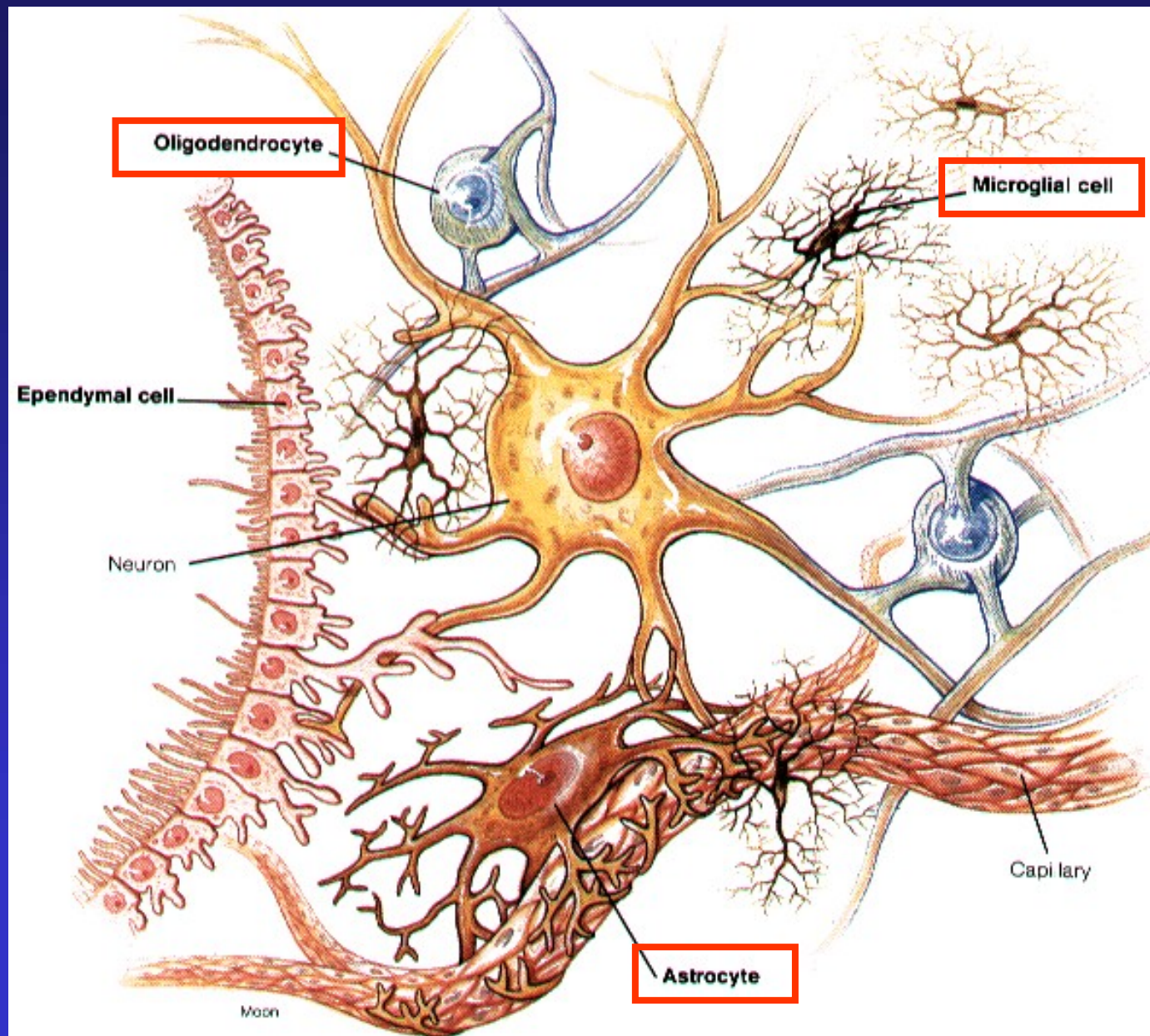
Astrocytes



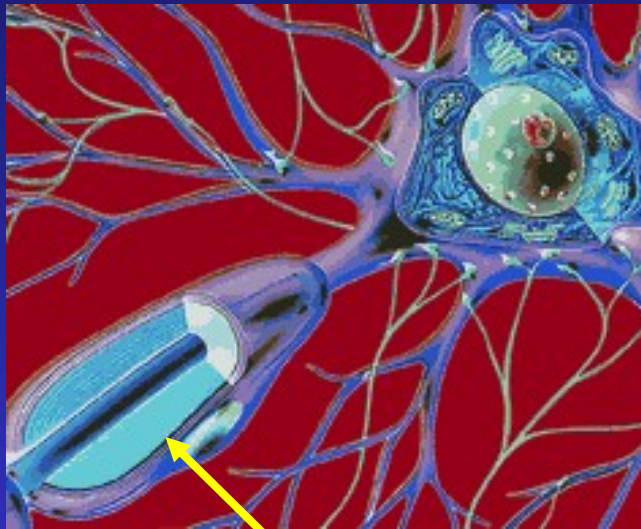
Oligodendrocytes



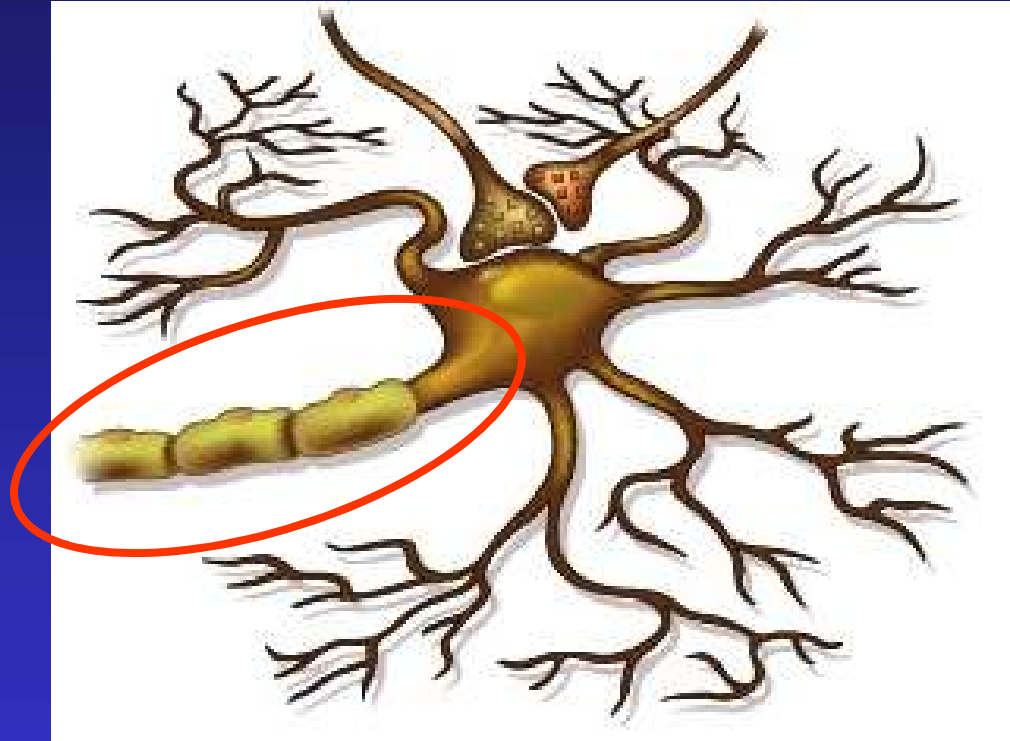
Microglie



Axones longs souvent recouverts d'une gaine de myéline.

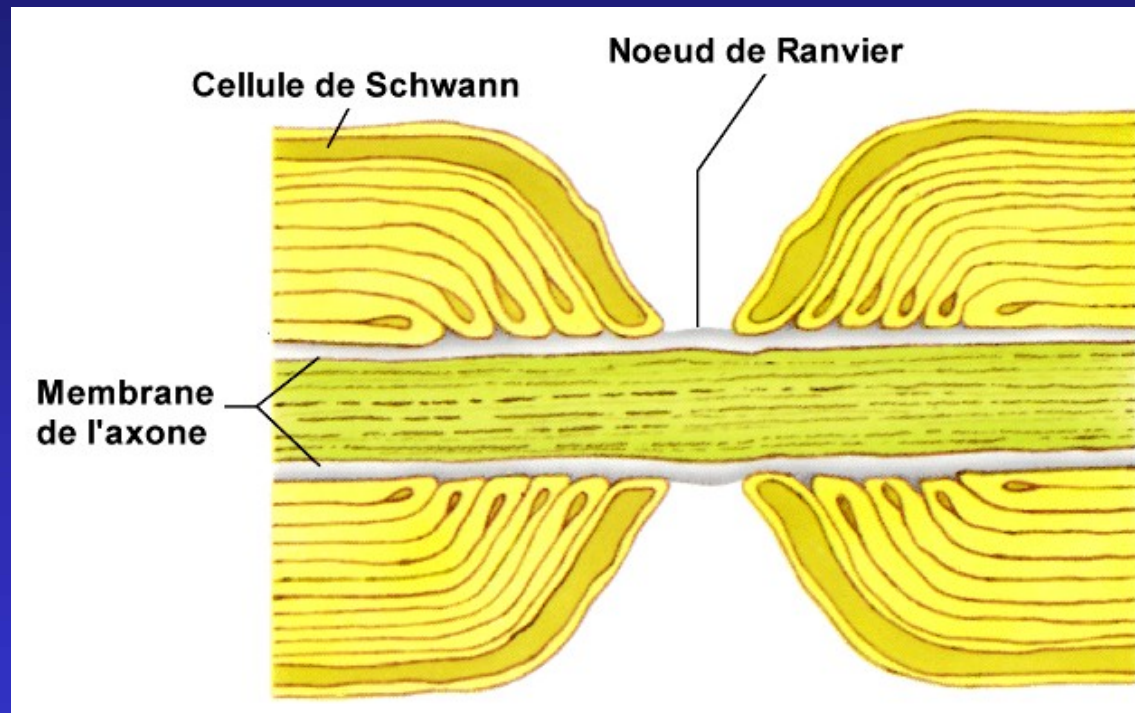


Formée de cellules gliales qui s'enroulent autour de l'axone.



↳ Myéline = Isolant électrique

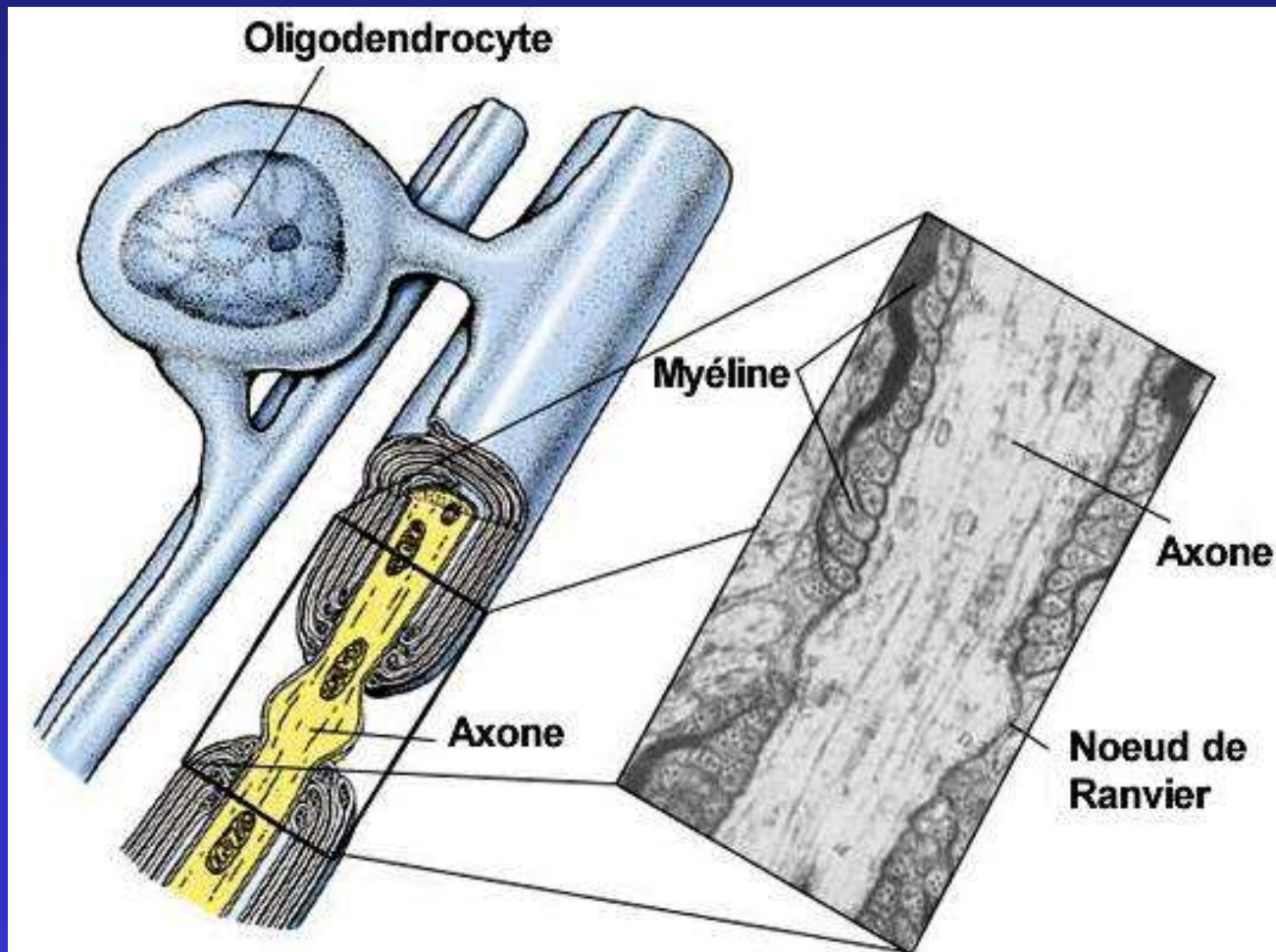
Espaces entre les cellules de Schwann = nœuds de Ranvier



- ↳ **Nœud de Ranvier** = moindre résistance au courant électrique
- ↳ **Conduction saltatoire** => augmente la vitesse de l'influx nerveux

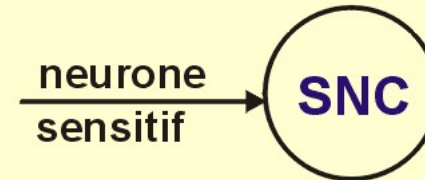
Myéline formée de:

- Cellules de Schwann (système nerveux périphérique)
- Oligodendrocytes (SNC)

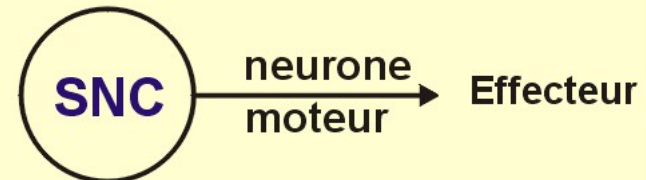


Classification fonctionnelle

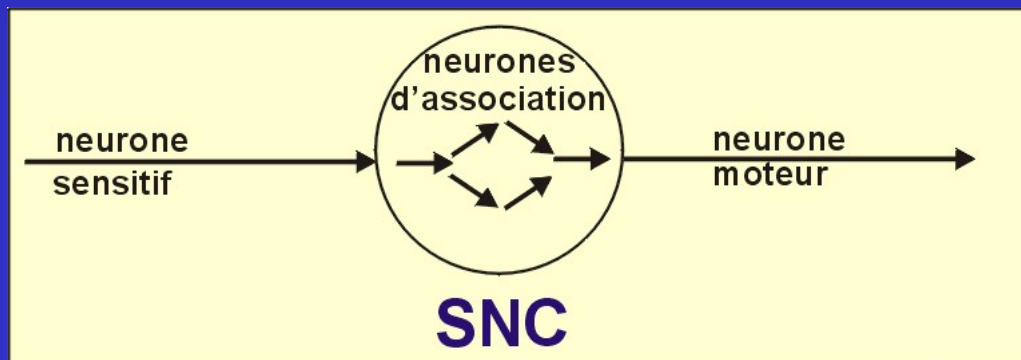
Neurone sensitif



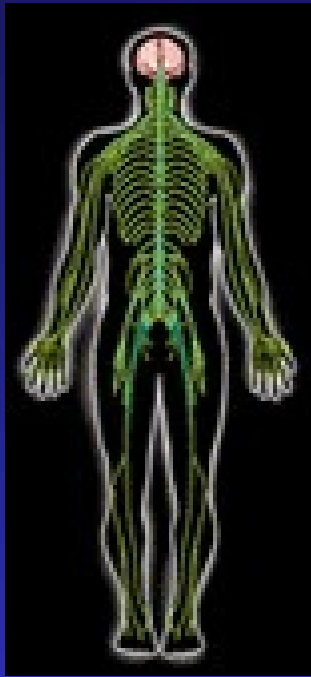
Neurone moteur



Neurone d'association



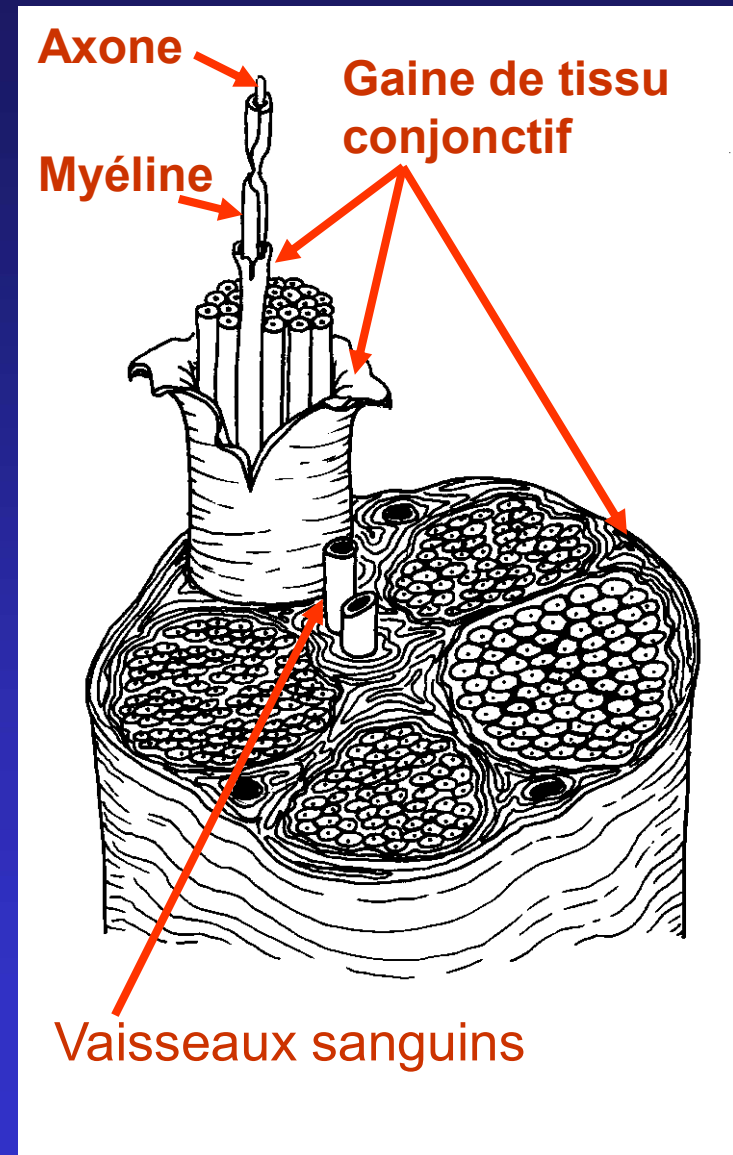
Structure des nerfs



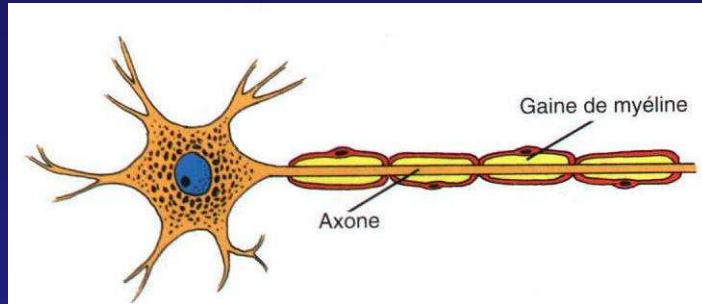
Les nerfs sont formés d'**axones** de neurones moteurs et de neurones sensitifs (certains ne contiennent que des fibres sensibles).

Nerf rachidien ~ 600 000 fibres nerveuses

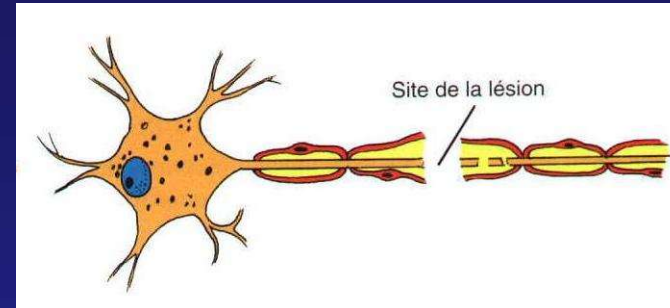
Le corps cellulaire est dans (ou tout près) du SNC.



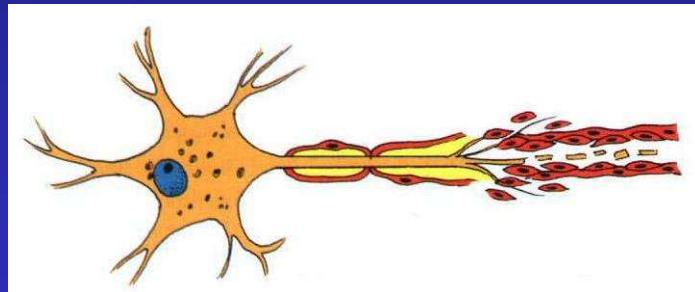
Régénération nerveuse



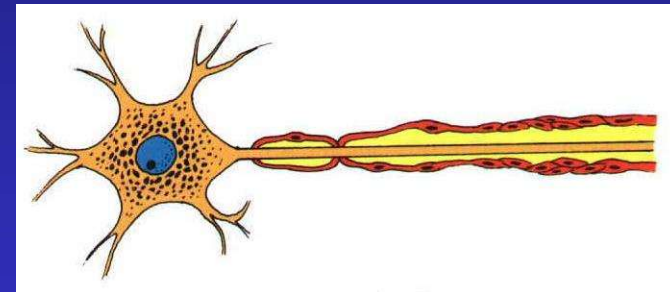
Neurone intact



Neurone sectionné



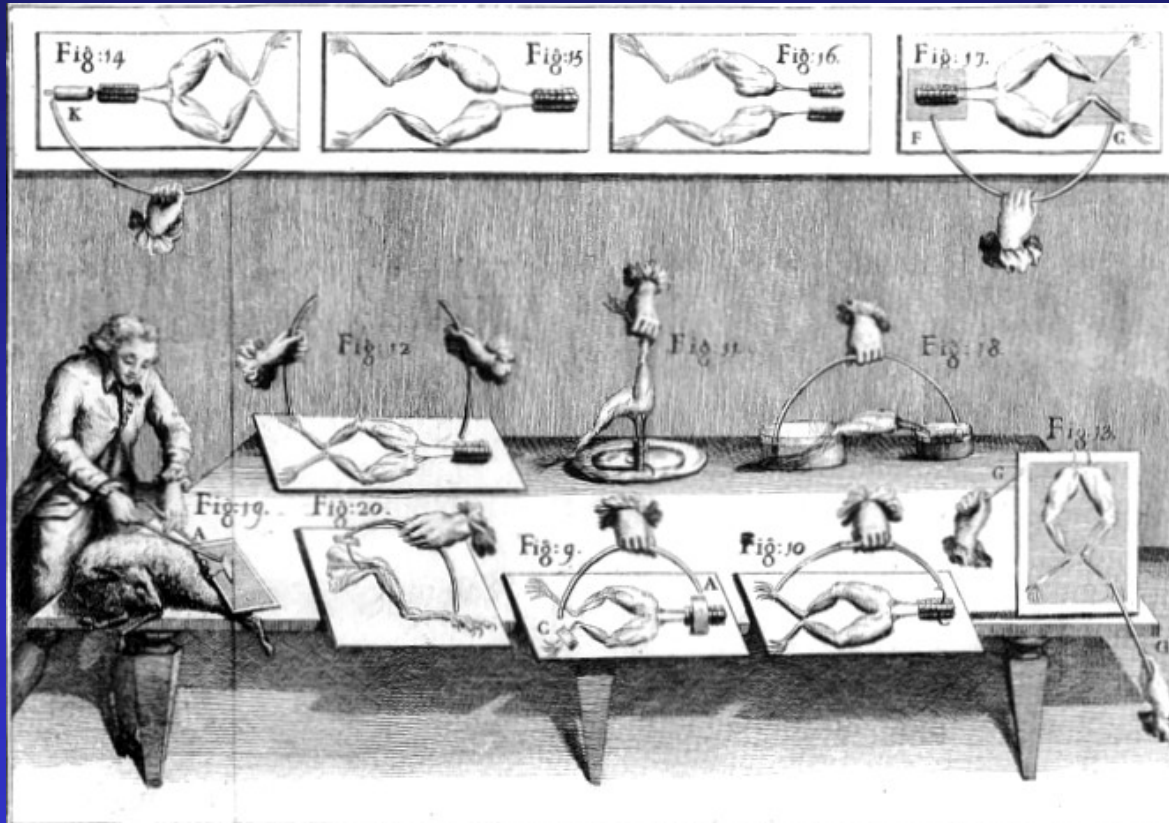
L'axone et une partie de la gaine de myéline en aval de la section dégénèrent



L'axone peut repousser en empruntant le "tunnel" formé par la gaine de myéline et l'endonèvre (1 à 5 mm par jour)

Dans un nerf, toutes les fibres ne parviennent à repousser correctement ou à emprunter "le bon chemin".

3- Potentiel de membrane et influx nerveux



Luigi Galvani (1737-1798).

Luigi Galvani
(1737 / 1798)

Un courant électrique appliqué à un nerf provoque la contraction des muscles d'une grenouille morte. Une *électricité animale* circule dans les nerfs.

L'électricité est-elle
l'explication de la vie?

1850 : l'Allemand H. von
Helmholtz (1821 - 1894) mesure
la vitesse de l'influx nerveux
dans un nerf.



Vitesse de quelques mètres par seconde seulement.
C'est donc beaucoup plus lent que l'électricité circulant
dans un fil métallique (~ vitesse de la lumière 200 000 km/s)

Andrew Fielding Huxley (1917 - 2012)
Alan Hodgkin (1914 - 1998)

Expériences sur les neurones
géants de calmar à la fin des
années 30 et dans les années 40.

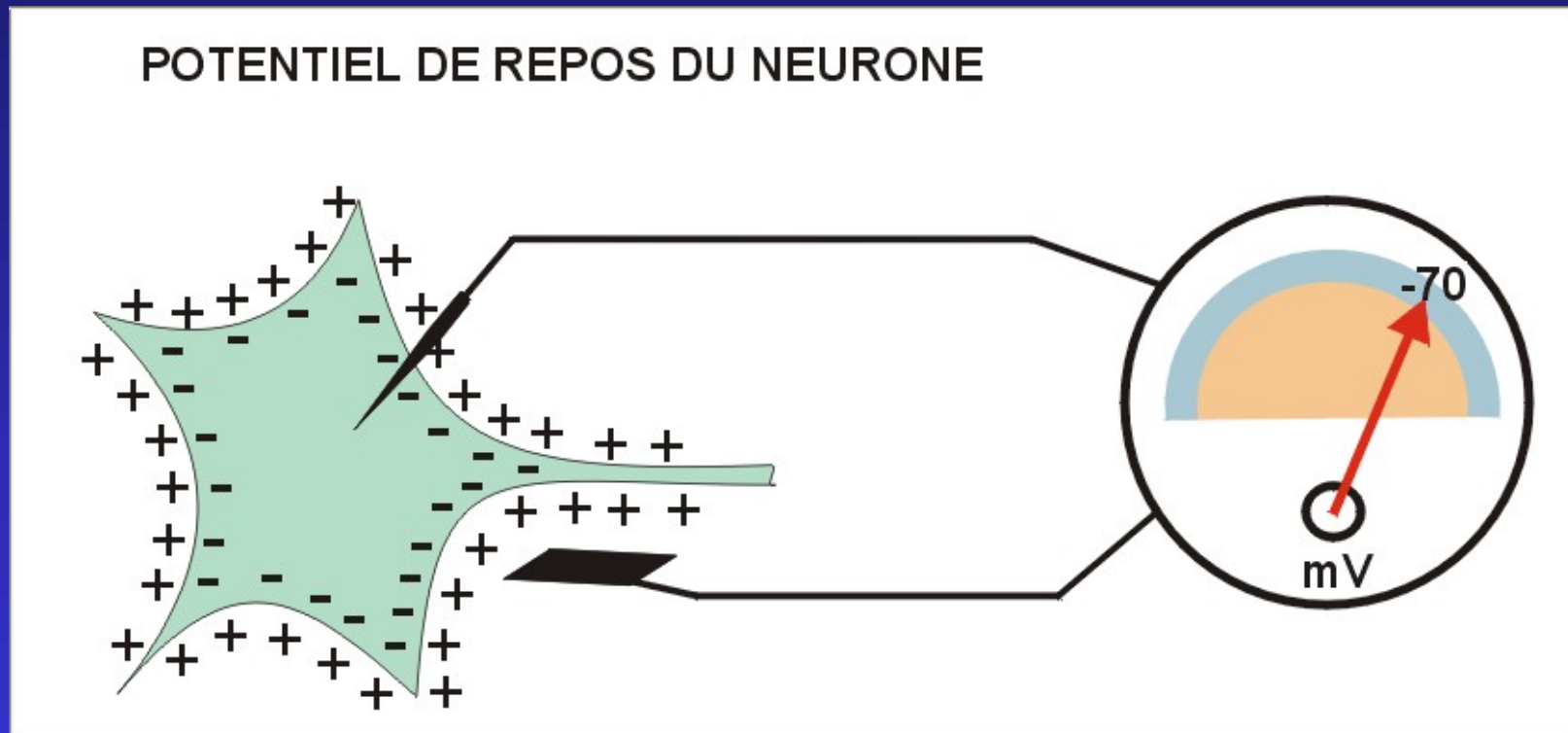
Axones géant de calmar



Ganglion
contenant les
corps cellulaires



Il y a une différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule.



Potentiel de repos : -70 mV (à -90 mV)

Concentrations en ions de chaque côté de la membrane:

Extérieur de la membrane:

- Ions positifs = Na^+ surtout (un peu de K^+ aussi)
- Ions négatifs = Cl^- surtout

Mais y a un léger surplus d 'ions +

Intérieur du neurone:

- Ions positifs = K^+ surtout (un peu de Na^+ aussi)
- Ions négatifs = Protéines et ions phosphates

Mais y a un léger surplus d 'ions -

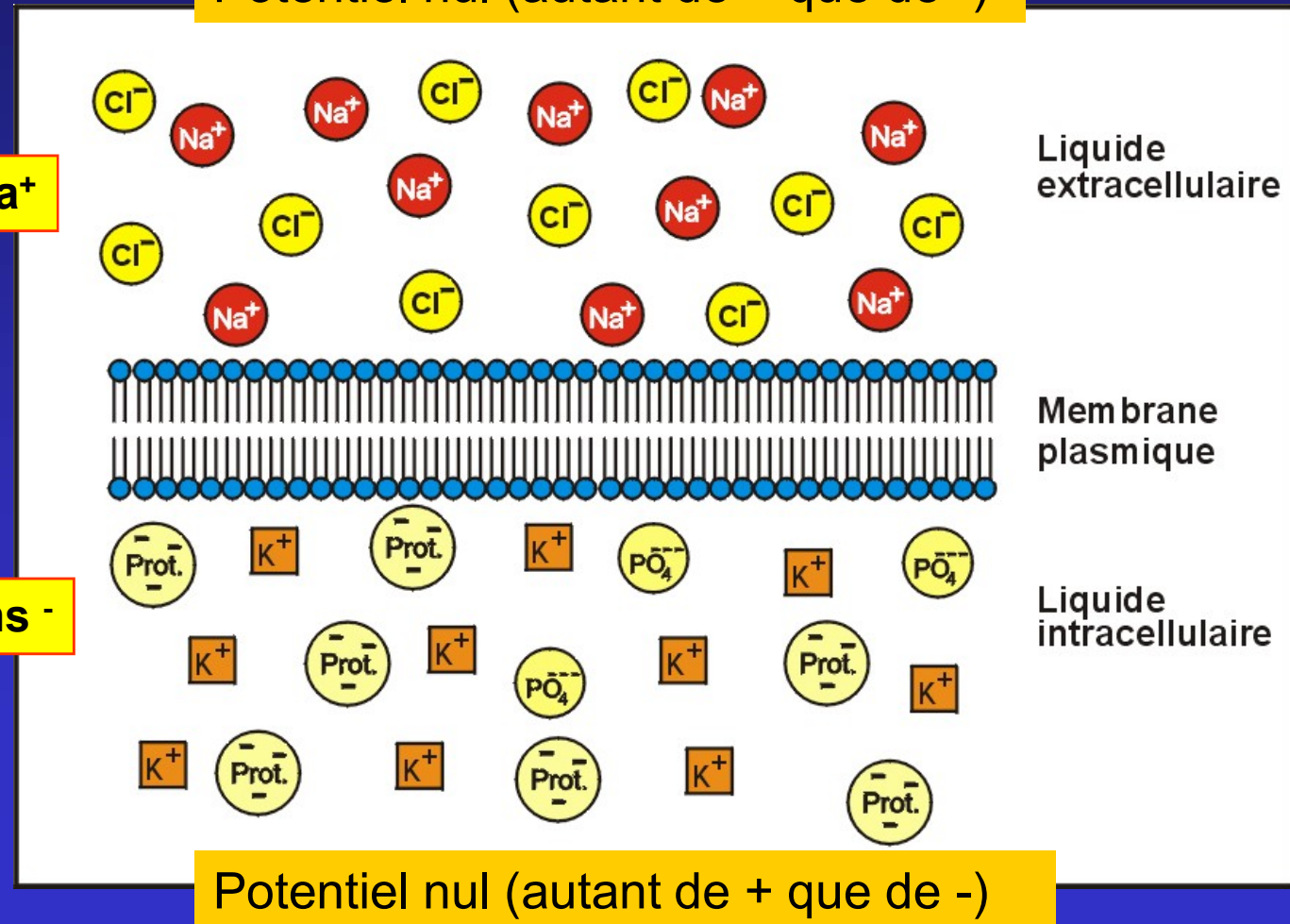
Supposons que de part et d'autre d'une membrane on ait autant d'ions positifs que négatifs:

10 Cl^- et 10 Na^+

Potentiel nul (autant de + que de -)

10 K^+ et 10 ions $^-$

Potentiel nul (autant de + que de -)



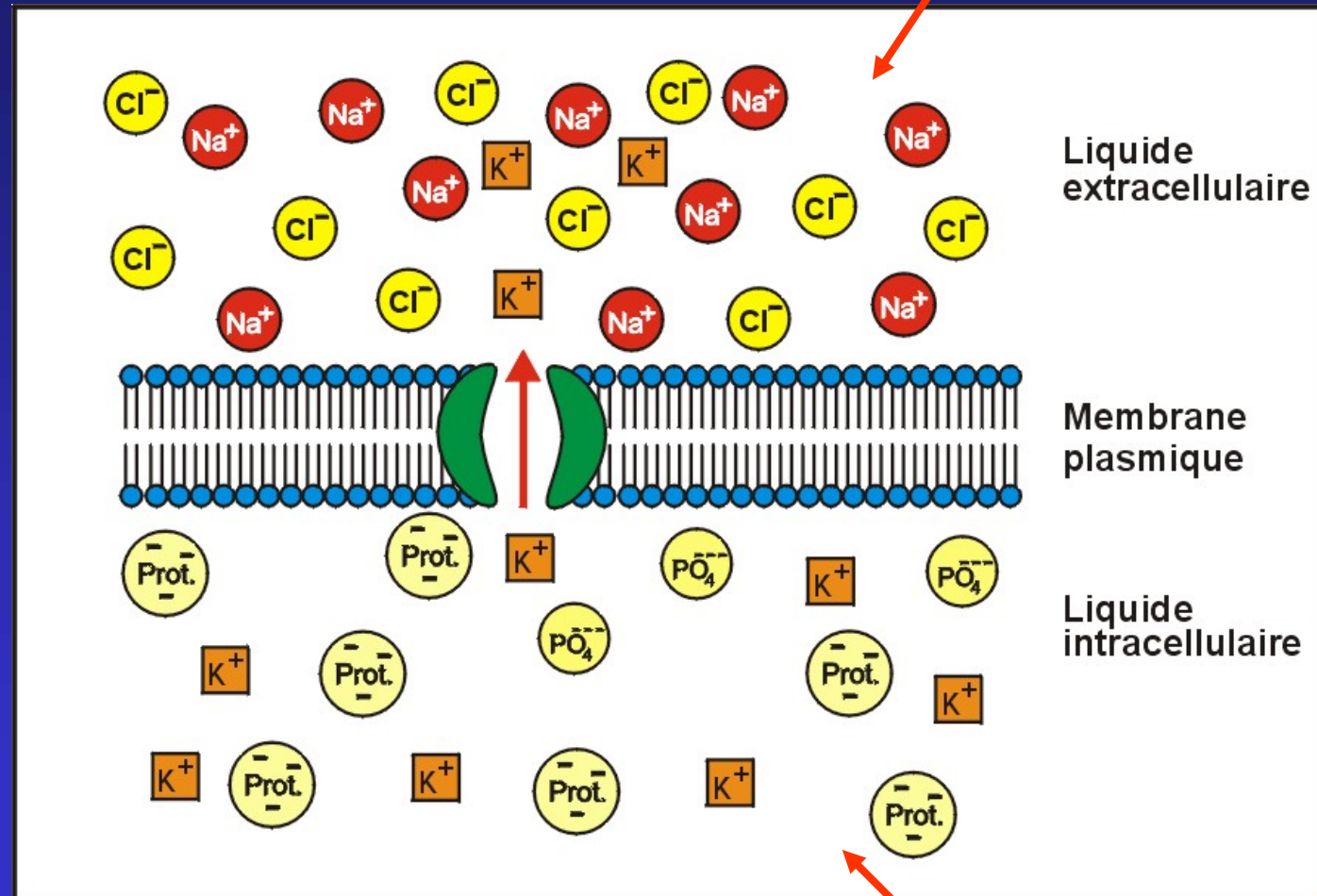
Que se passe-t-il si on ajoute des canaux permettant le passage des K^+ , mais pas des autres ions?

=> diffusion du potassium

13 charges + et 10 - = +3

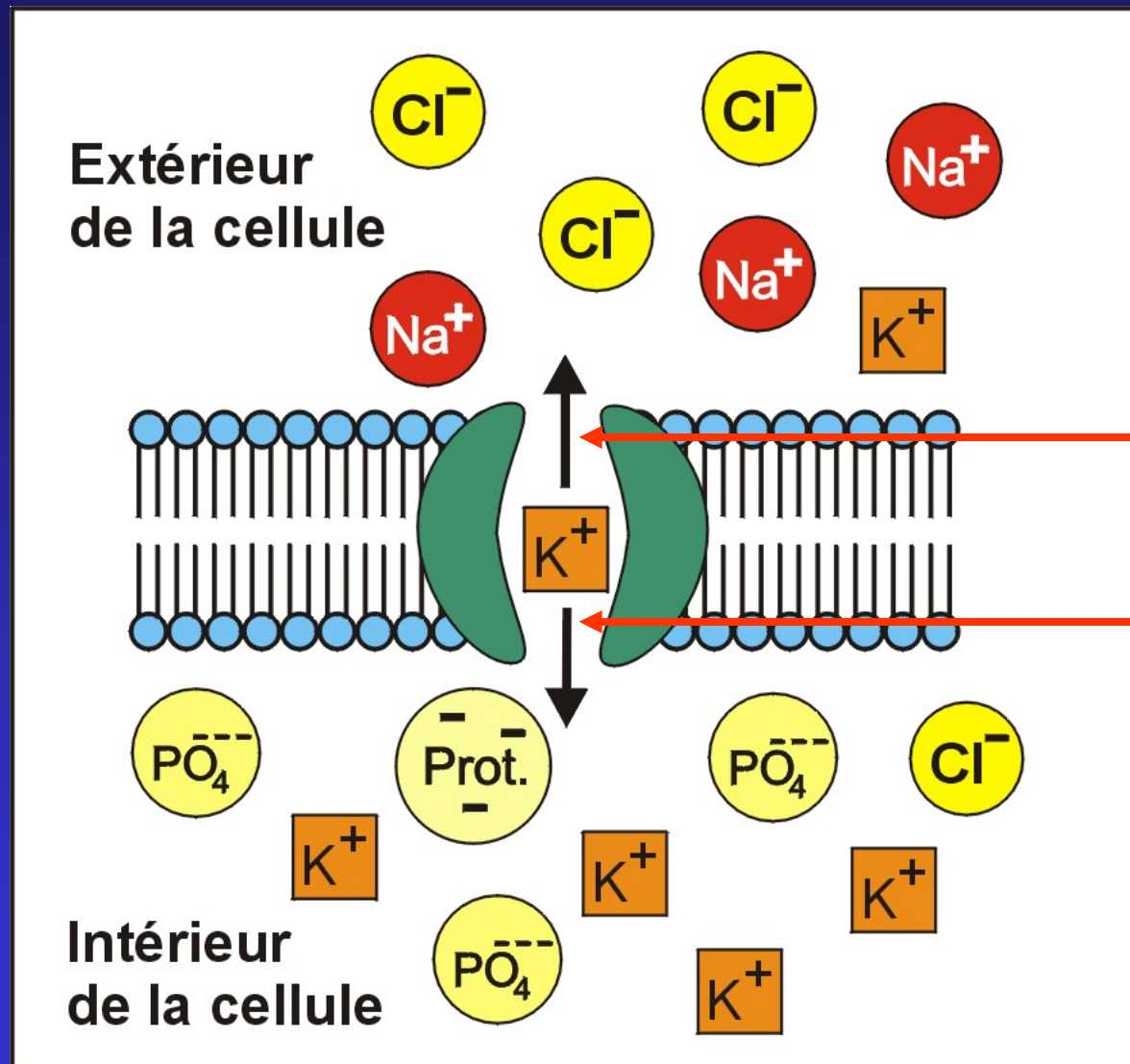
10 Cl^-
10 Na^+
3 K^+

10 ions -
7 K^+



7 charges + et 10 - = -3

La diffusion ne se fera pas jusqu'à équilibre des concentrations du K^+



Le K^+ cherche à diffuser en suivant son gradient de concentration

Le K^+ est attiré par les charges - de l'intérieur et repoussé par les charges + de l'extérieur

Le gradient électrique qui se forme arrête la diffusion.

Pour chaque ion susceptible de diffuser => deux forces opposées

Force chimique : fonction du gradient de concentration

- $W_c = RT \ln ([X]_{\text{ext}} / [X]_{\text{int}})$ pour ion +

R constante des gaz parfaits = $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

T température absolue en °K ($273 + T^{\circ}\text{C}$)

Force électrique : ions + attirés par charges – (et inversement)

- $W_e = F \cdot E$

F constante de Faraday = 96000 C.mol^{-1}

E différence de potentiel électrique

A l'équilibre : $W_c = W_e$

- $E = (RT/F) \cdot \ln ([X]_{\text{ext}} / [X]_{\text{int}})$

- Exemple : $E = -75 \text{ mV}$ pour K^+ ; $E = +55 \text{ mV}$ pour le Na^+

La polarité de la membrane est donc due:

- Différence de concentration en ions entre l'intérieur et l'extérieur.
- Perméabilité sélective de la membrane

La polarité se maintient au repos à un niveau différent des équilibres pour le K^+ et le Na^+

=> pompes à sodium / potassium.

~ 70% de l'énergie dépensée par un neurone sert à faire fonctionner les pompes à sodium/potassium

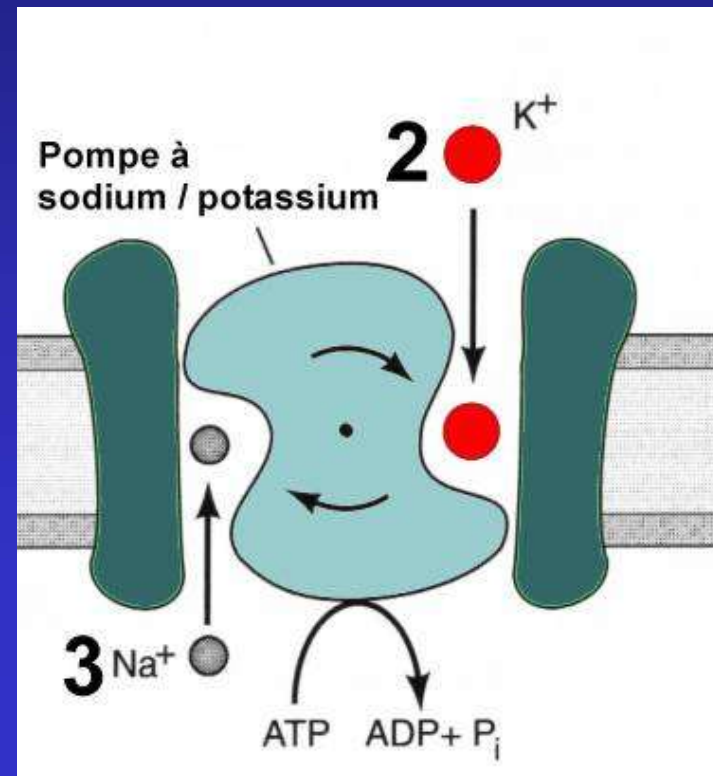
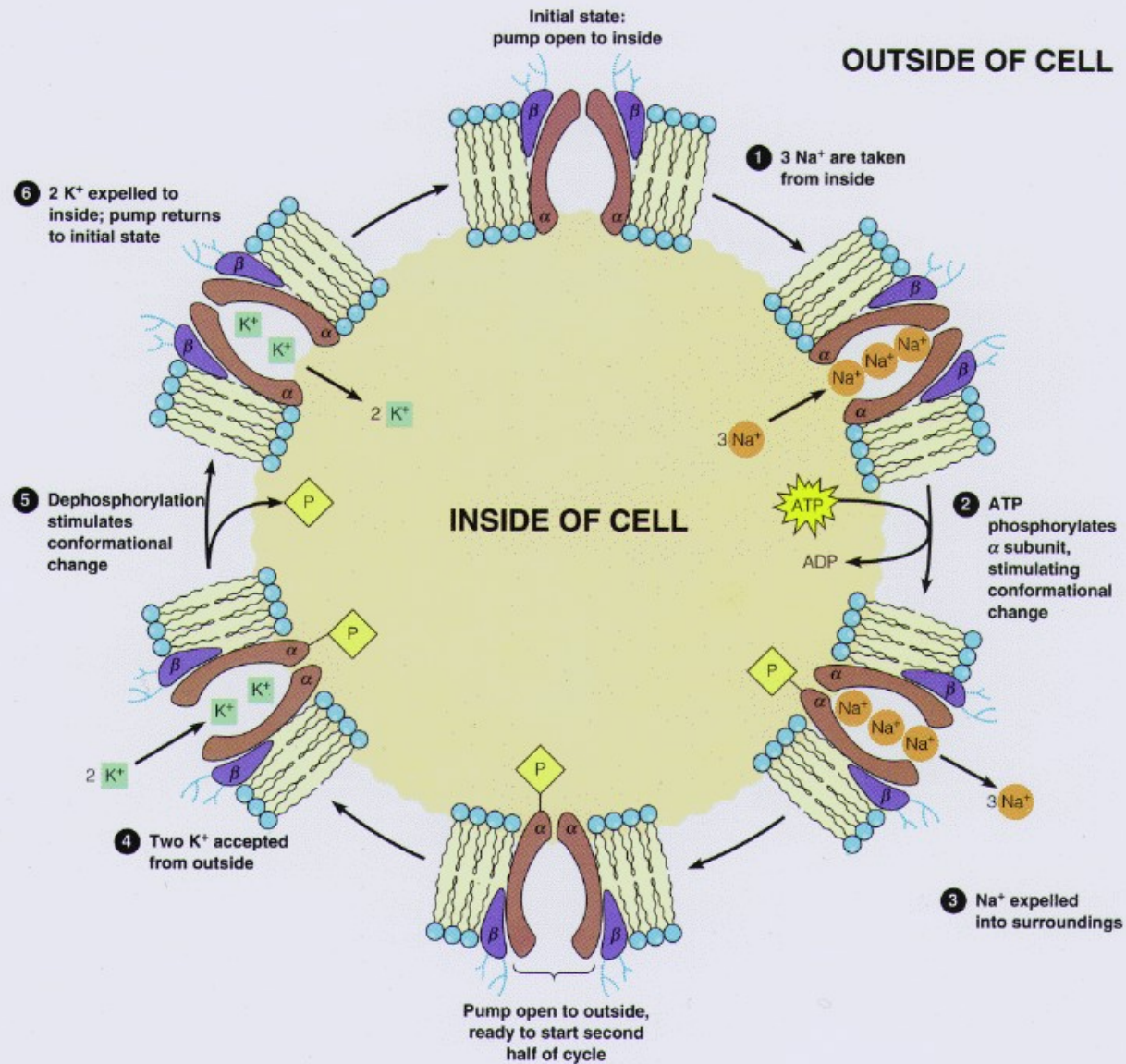


Figure 10.25 Schematic model of the sodium-potassium pump in operation

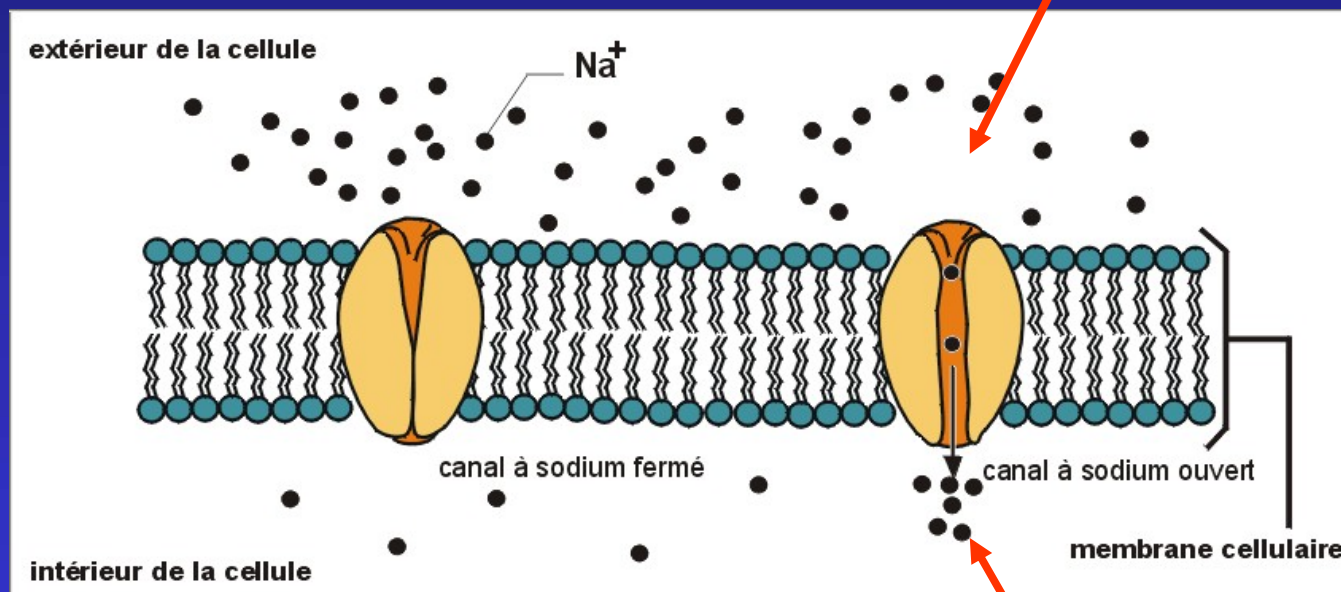


Le potentiel d'action

Les neurones peuvent réagir à un stimulus (excitabilité).

Réaction = ouverture de canaux à sodium de la membrane

Baisse d'ions $+$ à l'extérieur



Hausse d'ions $+$ à l'intérieur

Entrée massive de Na^+ ($\sim 30\,000$ à la s) $\Rightarrow$ « baisse »
de la polarité là où les canaux à sodium se sont ouverts.

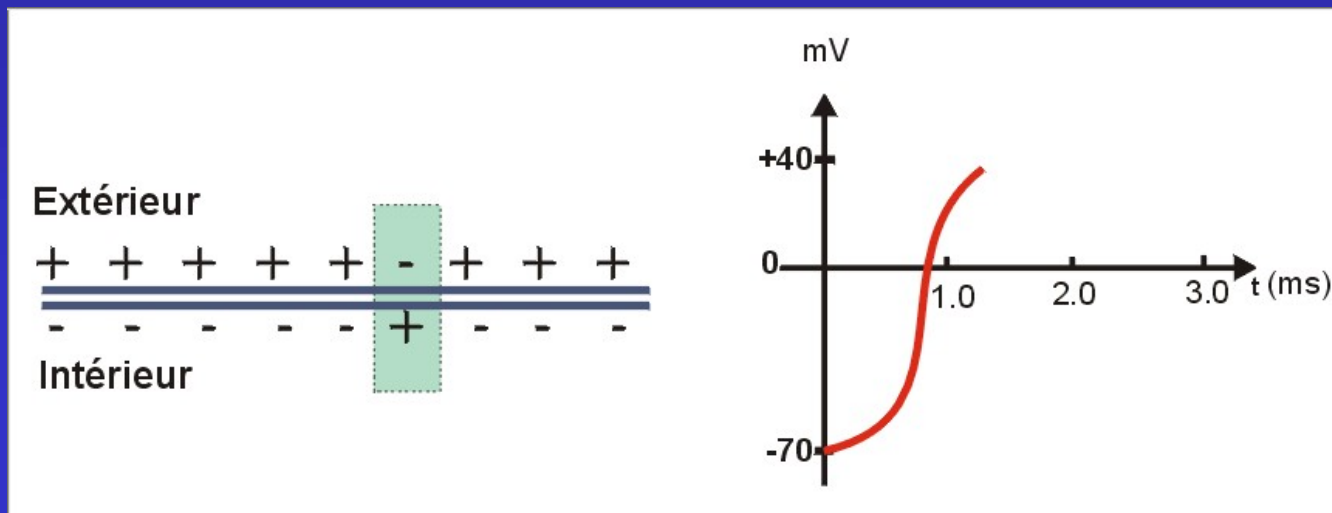
- 70mV $\rightarrow$ - 60mV $\rightarrow$ - 50 mV $\rightarrow$...

Si la polarité atteint un certain **seuil** (~ -50 mV)

=> le phénomène s'amplifie : d'autres canaux à sodium s'ouvrent soudainement (*canaux tensiodépendants ou voltagedépendants*).

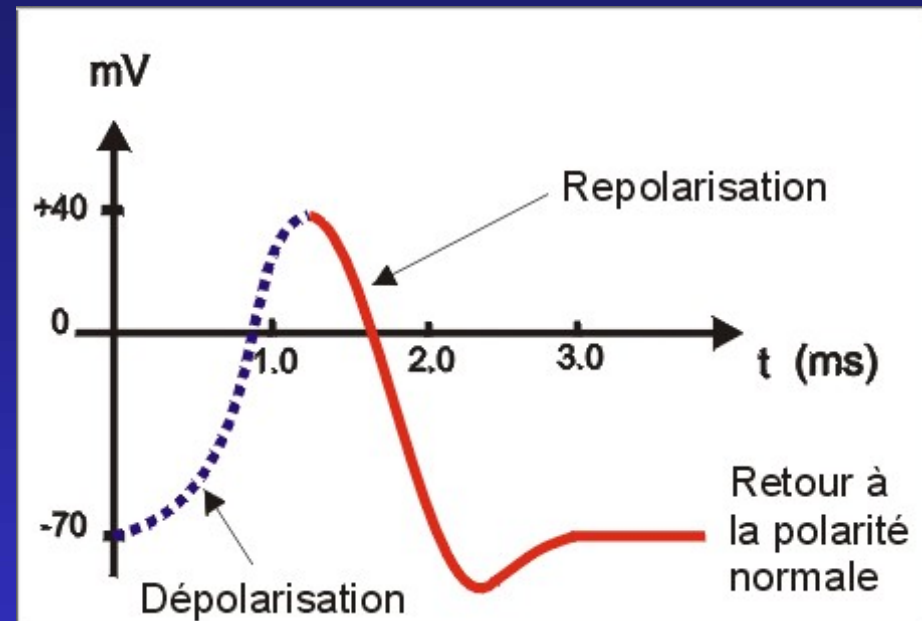
La dépolarisation va atteindre une valeur limite :

$\sim +40$ mV au point de la membrane où les canaux se sont ouverts.

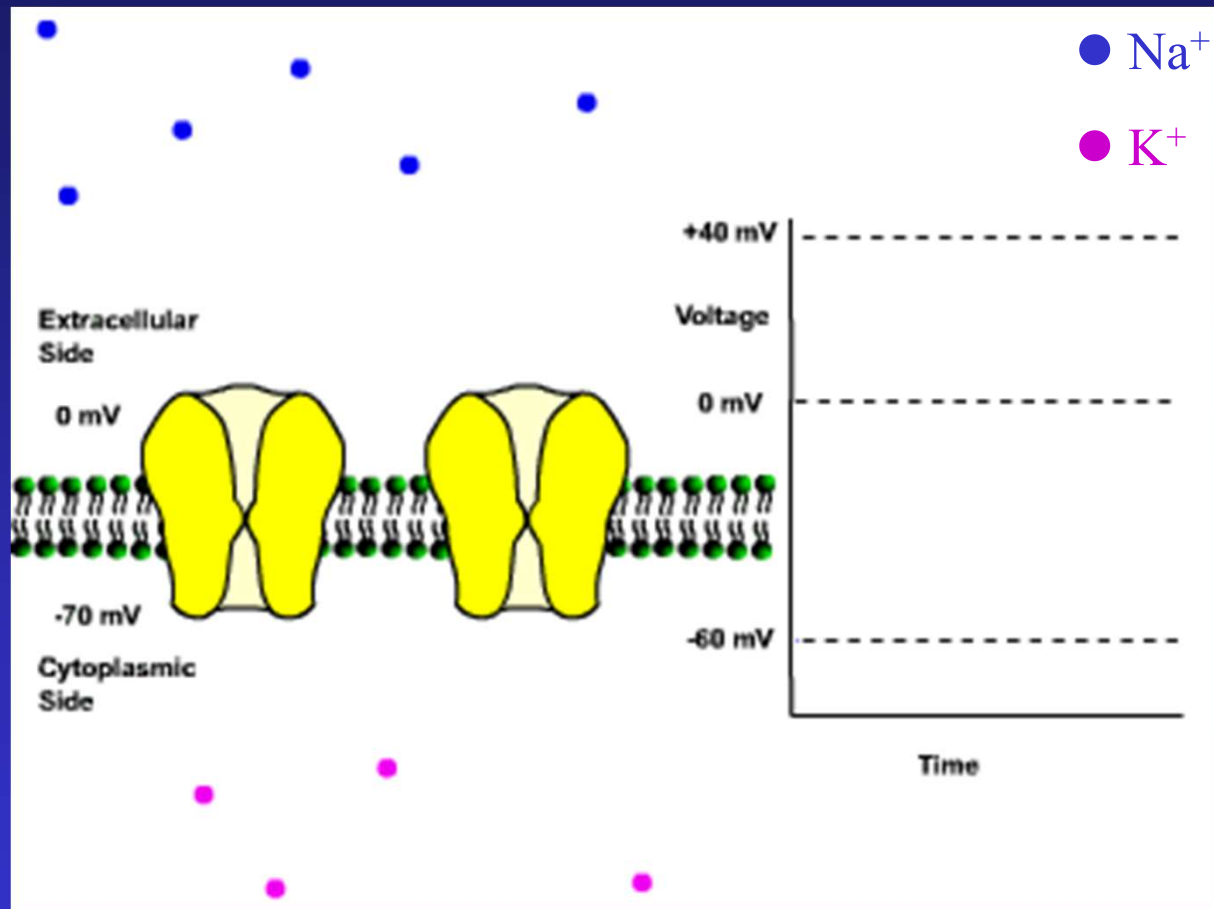


Le point dépolarisé reprend rapidement sa polarité:

- Fermeture des canaux à sodium.
- Ouverture de canaux à K^+ qui étaient fermés
=> $\uparrow$ perméabilité au K^+
- => $\uparrow$ sortie de K^+



= potentiel d'action



⇒ Puis pompe Na⁺/K⁺ : rétablit les concentrations en Na⁺ et K⁺ initiales

L'influx nerveux

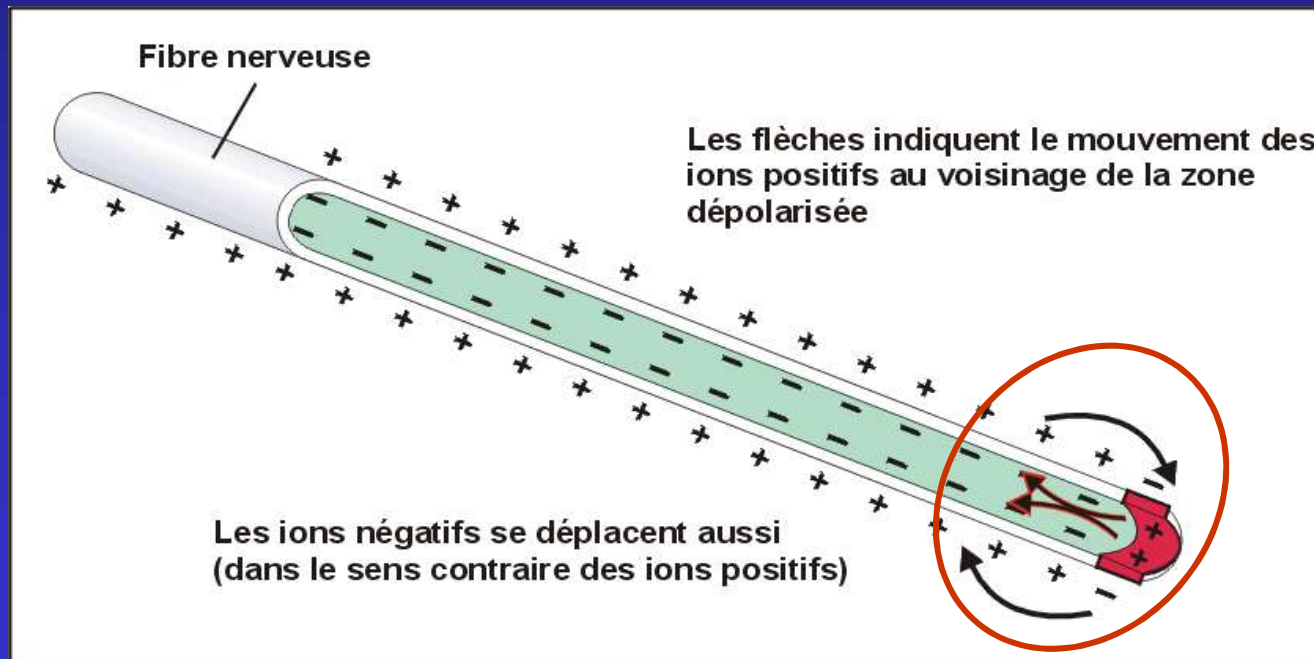
Potentiel d'action en un point de la membrane

=> déplacement d'ions au voisinage de la zone dépolarisée

= courants électriques locaux

=> ouverture de canaux à sodium TENSIDÉPENDANTS

= dépolarisation de la zone voisine.



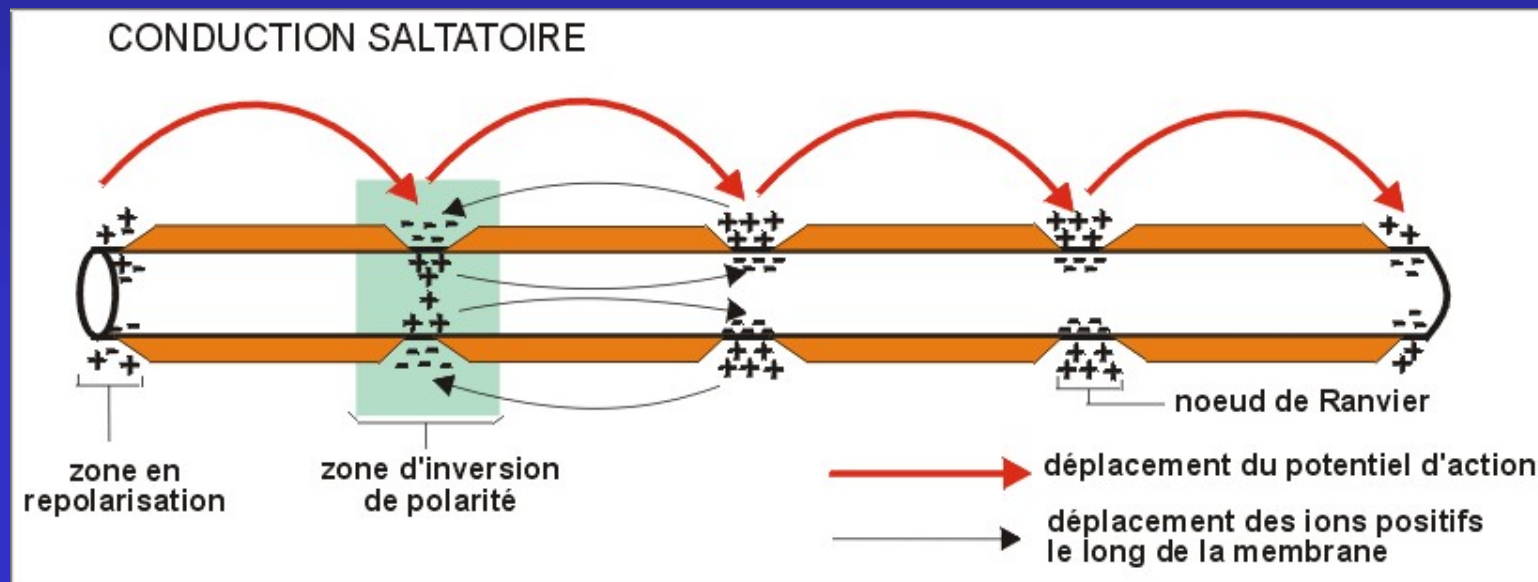
Influx nerveux = déplacement d'un potentiel d'action créé en chaque point le long de la membrane du neurone

Vitesse de déplacement de l'influx

↪ ~ 3 Km / heure à ~ 300 Km / heure

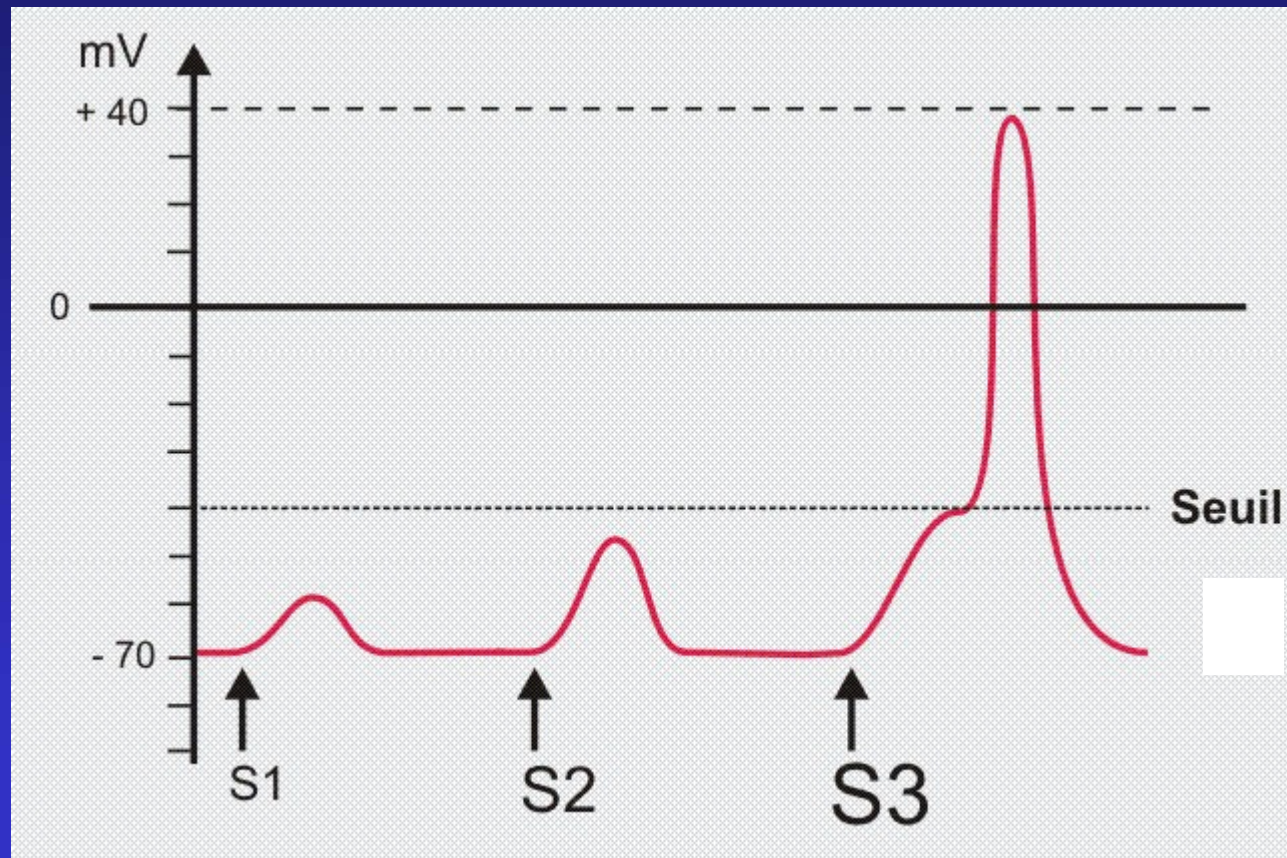
Vitesse dépend:

- Diamètre de la fibre nerveuse : $\uparrow$ diamètre $\Rightarrow \uparrow$ vitesse
- Présence de myéline : $\uparrow$ vitesse (conduction saltatoire)



Loi du tout ou rien

Pour qu'il y ait potentiel d'action, la dépolarisation au point stimulé doit dépasser un certain seuil (~ -40 à ~ -50 mV).



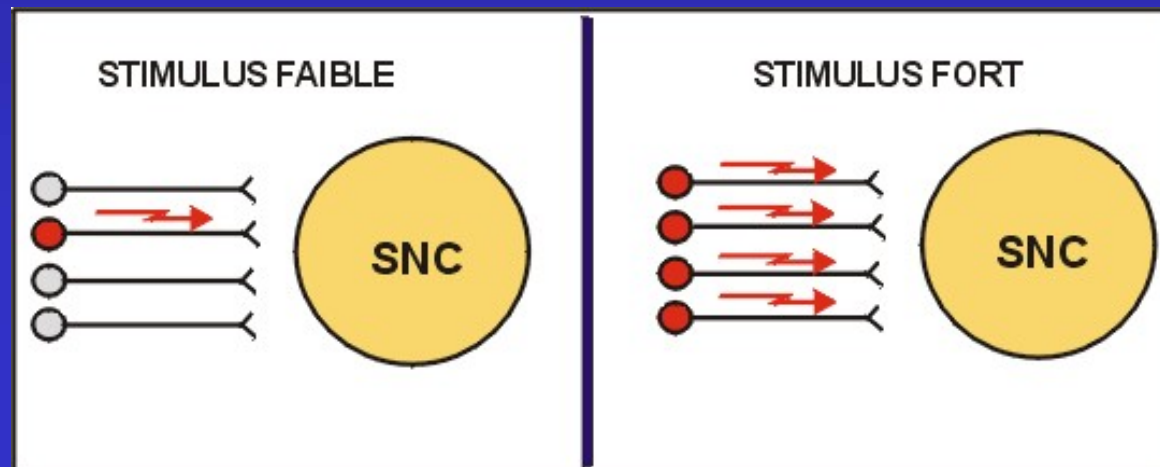
Le stimulus 1 (S1) est plus petit que S2 qui est plus petit que S3. Seul S3 provoque une dépolarisation qui atteint le seuil du neurone.

- Si la dépolarisation ne dépasse pas le seuil : la membrane reprend sa polarisation normale et il n'y a pas d'influx.
- Si la dépolarisation dépasse le seuil ==> ouverture de canaux tensiodépendants : dépolarisation jusqu'à + 40 mV et repolarisation = potentiel d'action
==> influx nerveux
- Peu importe l'intensité du stimulus, la dépolarisation ne dépassera pas + 40 mV

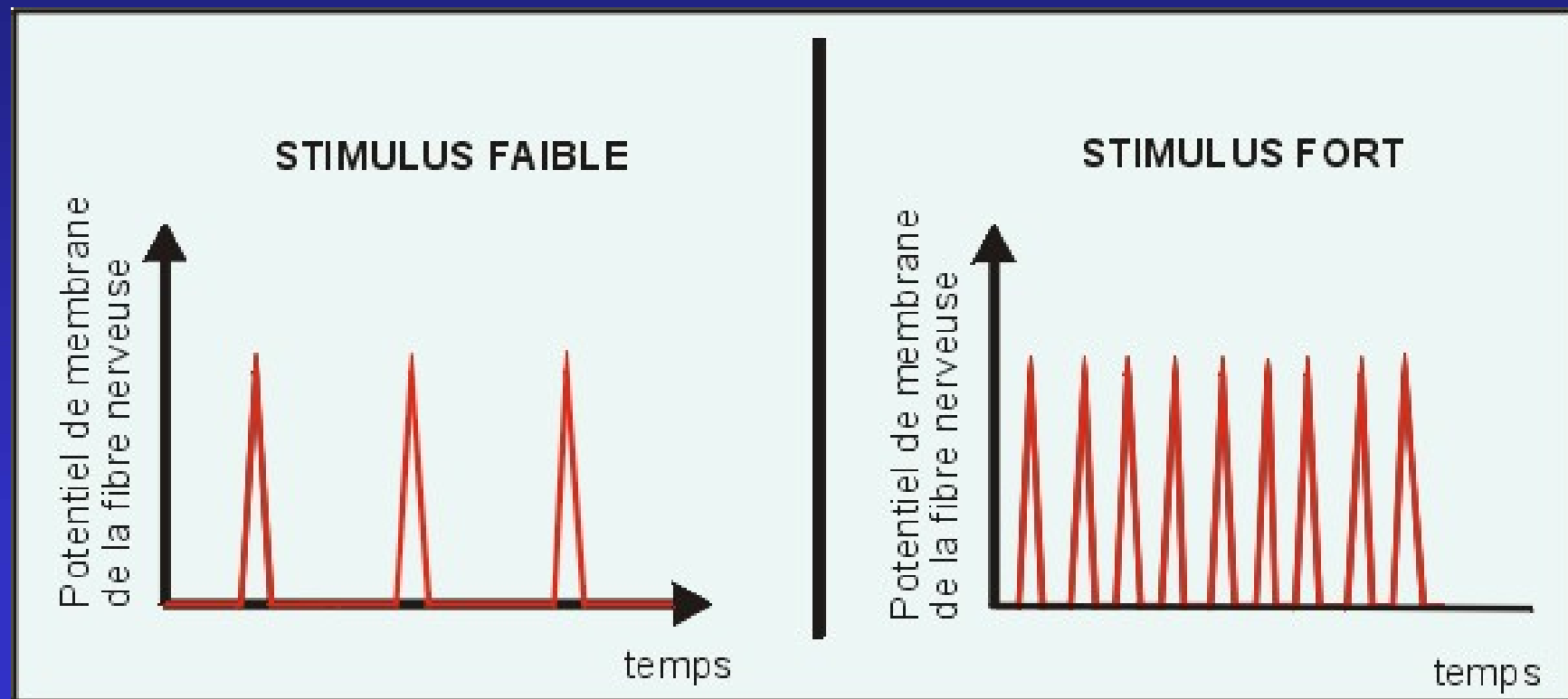
Perception de l'intensité du stimulus

Le SNC peut faire la différence entre un stimulus faible et un stimulus fort même si le potentiel d'action est le même dans les deux cas:

1. Un stimulus fort fait réagir plus de neurones qu'un stimulus faible

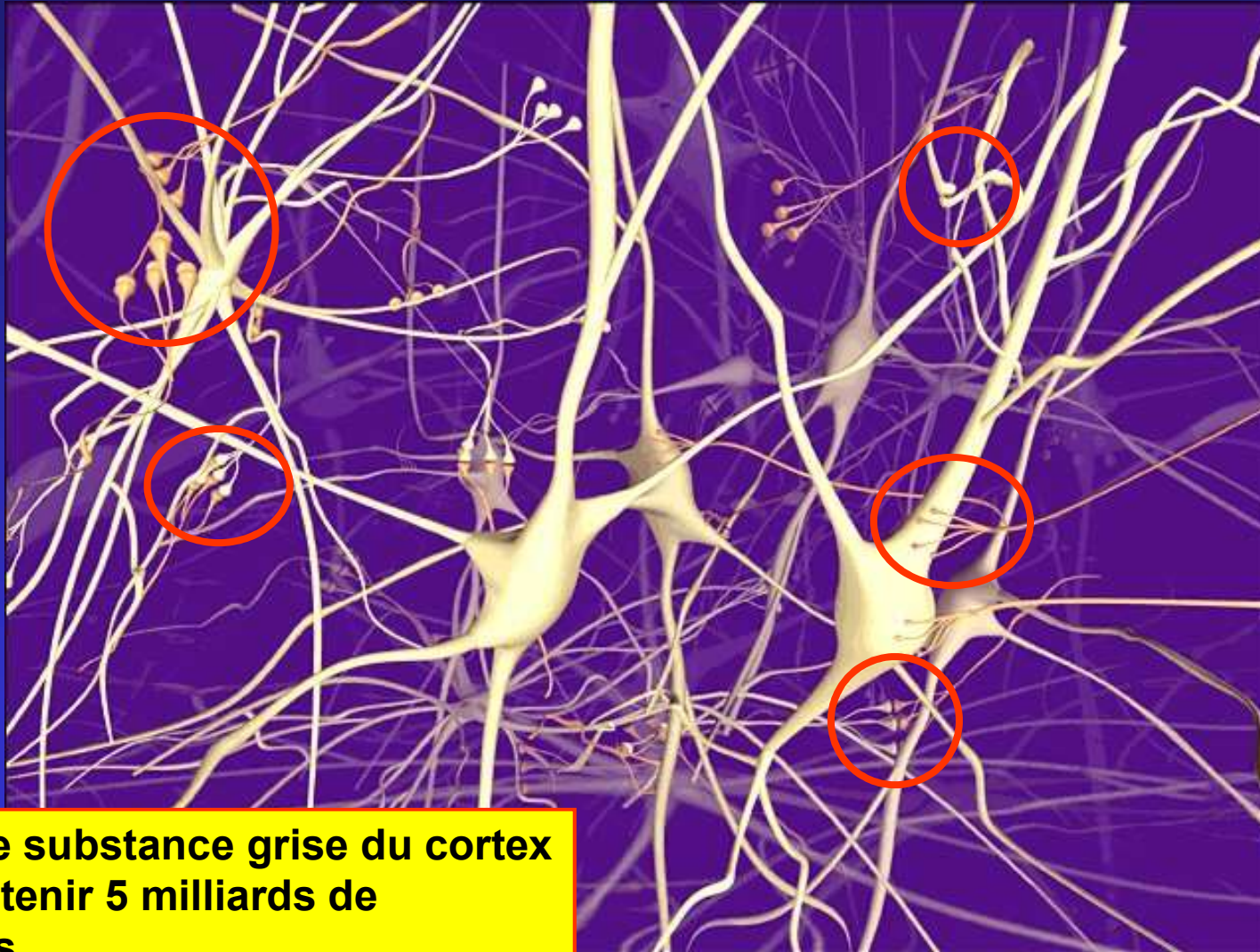


2. La fréquence des potentiels produits est plus grande si le stimulus est fort.



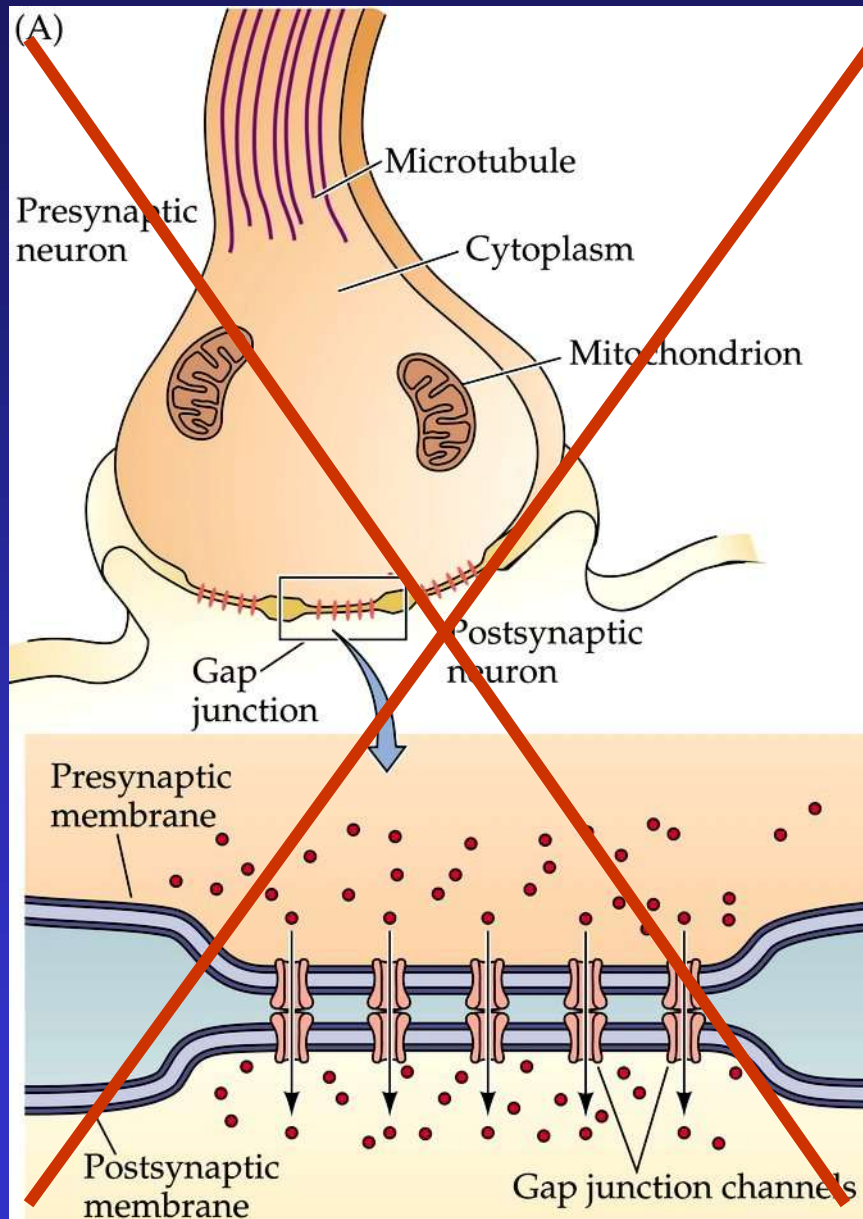
4. Synapse et neurotransmetteurs

Synapse = point de « connexion » entre deux neurones

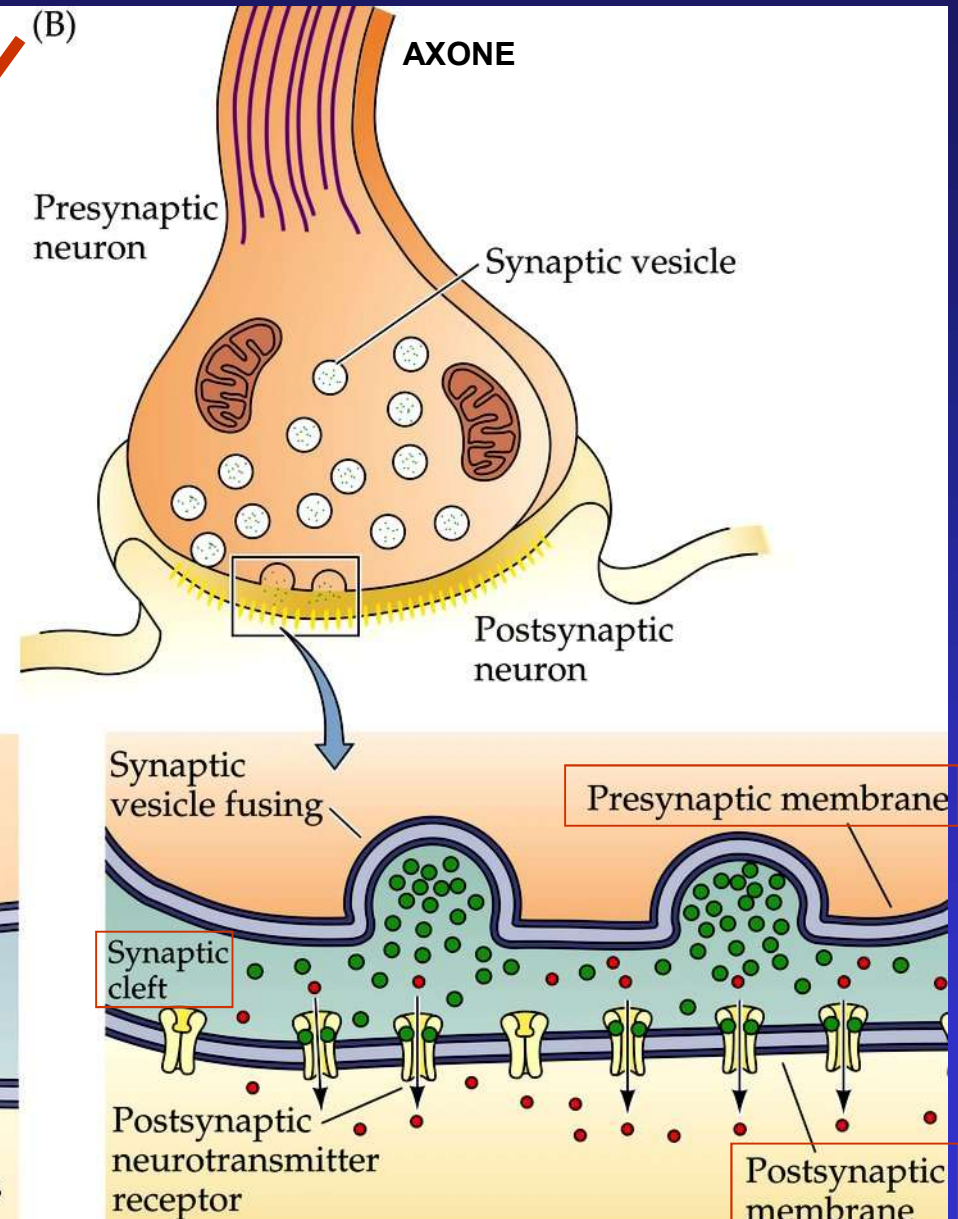


1 mm³ de substance grise du cortex
peut contenir 5 milliards de
synapses.

Deux types de synapses:



Synapse électrique (gap junction)



Synapse chimique

Dépolarisation de la membrane du bouton synaptique



Ouverture de canaux à Ca^{++} tensiodépendants
dans la membrane du bouton et entrée de Ca^{++}



Libération par exocytose du
neurotransmetteur dans la fente synaptique



Le neurotransmetteur se fixe sur son récepteur
sur le neurone postsynaptique



La fixation du neurotransmetteur provoque
l'ouverture de canaux ioniques

La liaison du récepteur avec le neurotransmetteur peut avoir deux effets:

Ouverture de canaux à sodium

==> ↓ polarité de la membrane

==> potentiel d'action (si la dépolarisation > seuil)

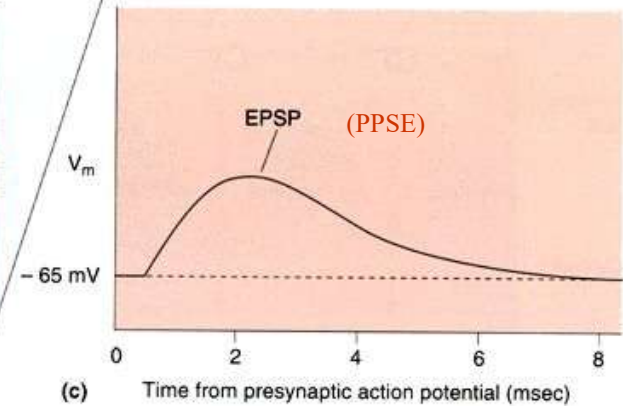
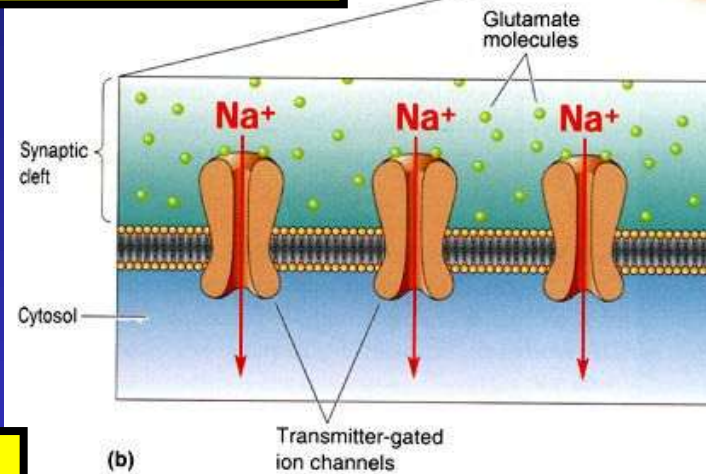
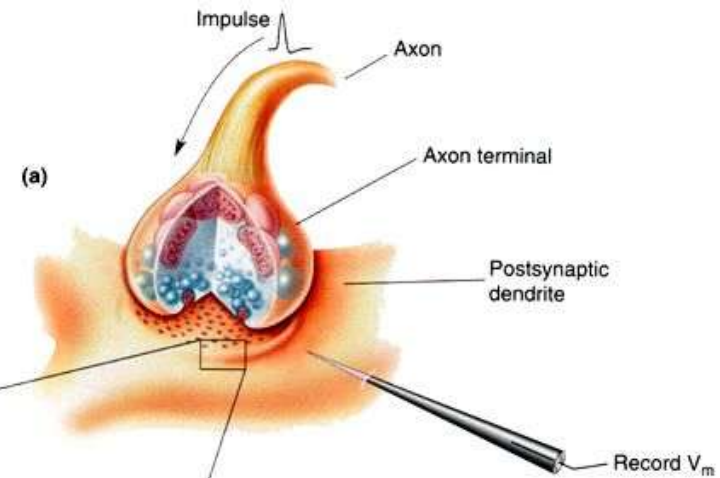
==> influx

Ouverture de canaux à Cl⁻ ou de canaux supplémentaires à K⁺

==> ↑ polarité de la membrane

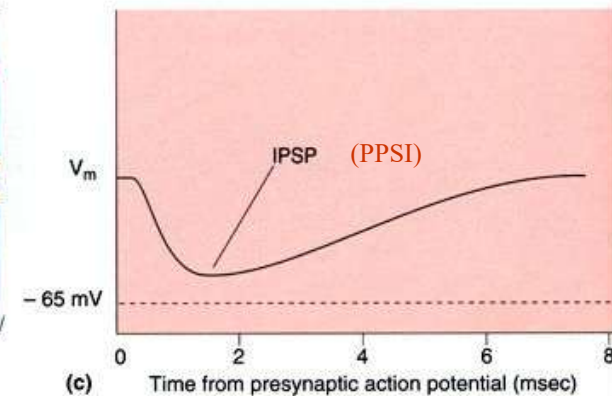
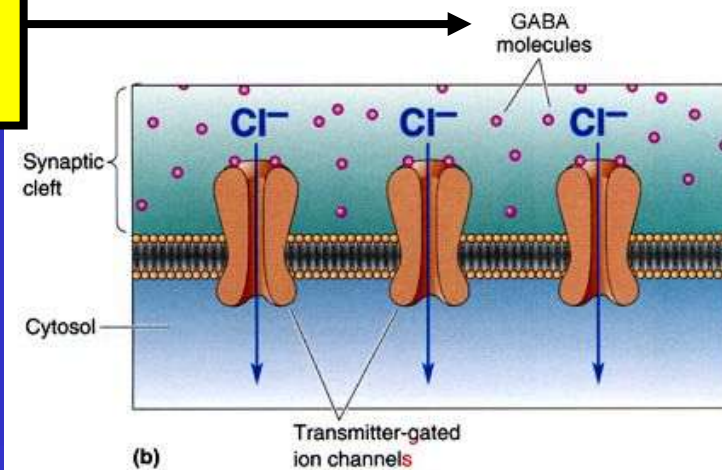
==> neurone plus difficile à dépolariser (seuil plus difficile à atteindre)

Le glutamate est un neurotransmetteur excitateur



Le GABA est un neurotransmetteur inhibiteur

(acide gamma amino-butrique)



Effet du neurotransmetteur dépend:

- Du type de neurotransmetteur
- Du type de récepteur

Neurotransmetteur excitateur

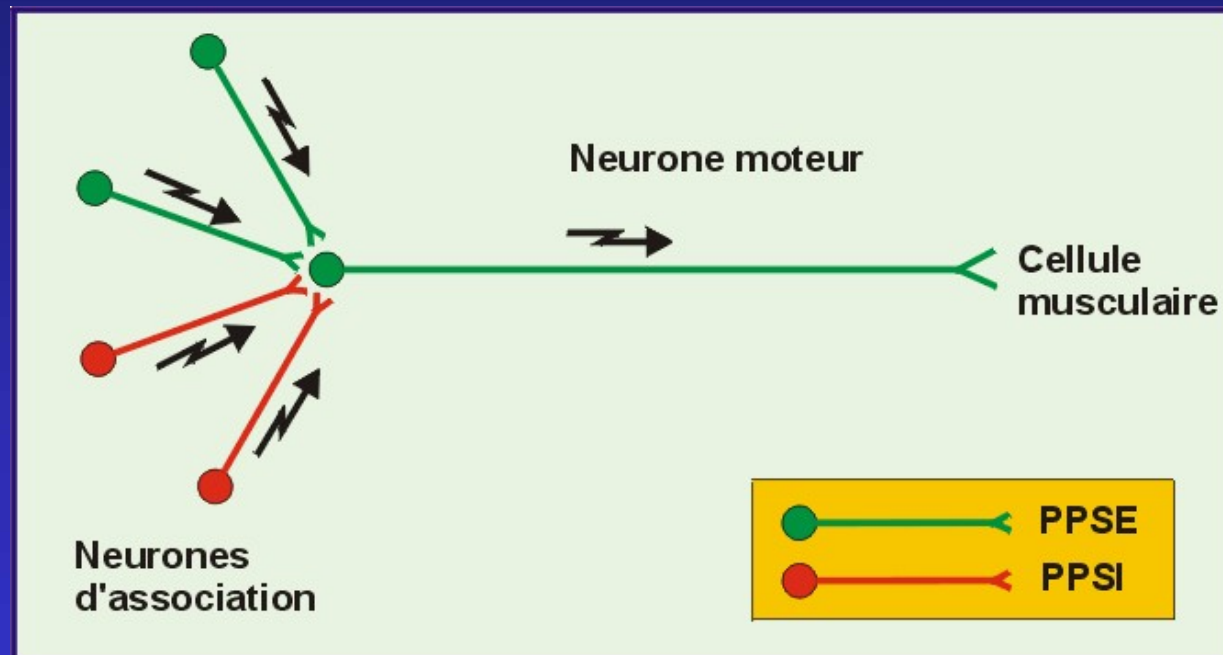
==> **PPSE** (potentiel postsynaptique excitateur)

Neurotransmetteur inhibiteur

==> **PPSI** (potentiel postsynaptique inhibiteur)

Chaque neurone reçoit des terminaisons PPSE et des terminaisons PPSI

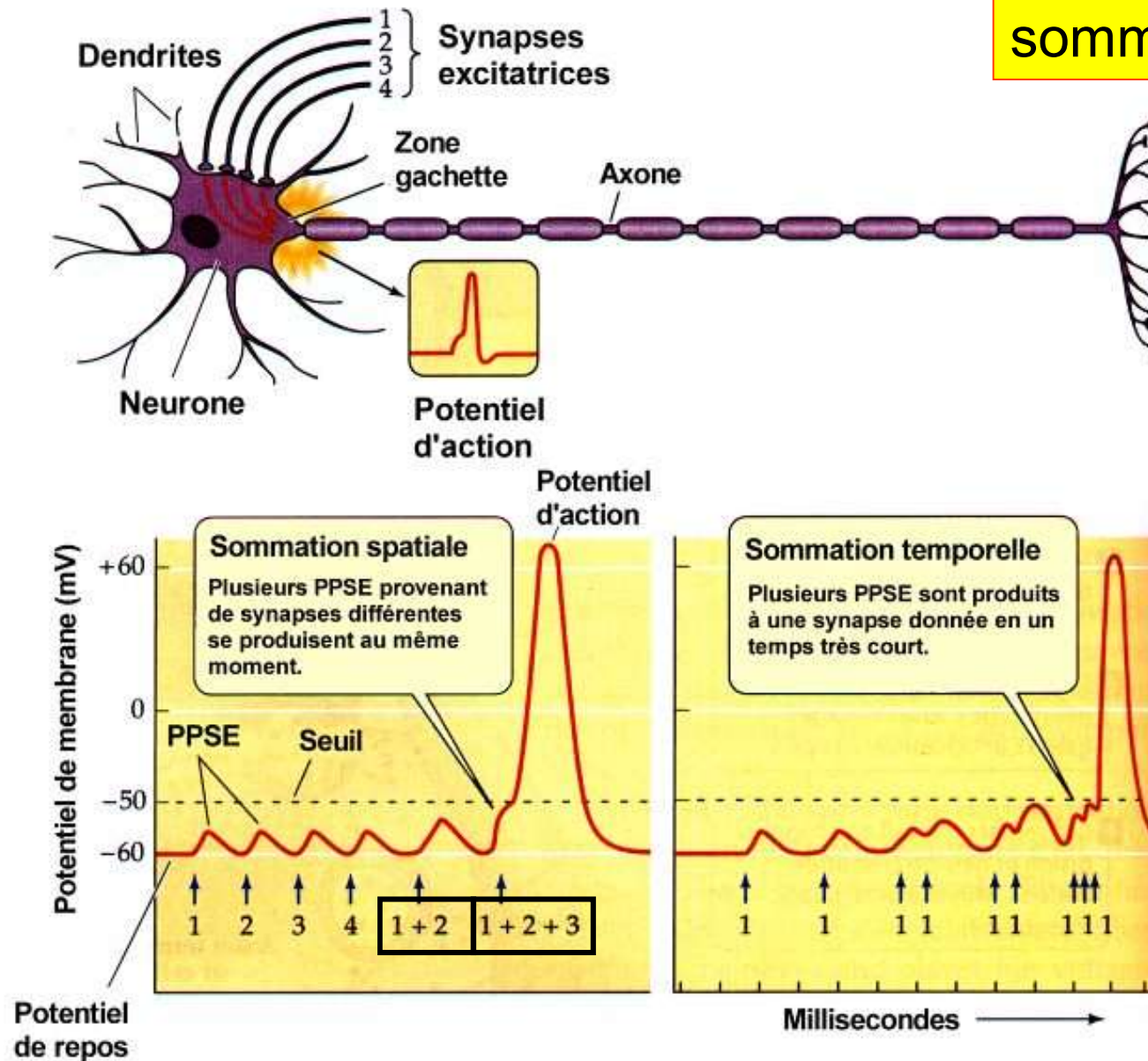
Ex. neurone moteur



Si $PM = PR + PPSE + PPSI > \text{au seuil (ex -50 mV)} \Rightarrow \text{Influx nerveux}$

Si $PM = PR + PPSE + PPSI < \text{au seuil} \Rightarrow \text{pas d'Influx nerveux}$

Sommation spatiale et sommation temporelle



Un neurotransmetteur

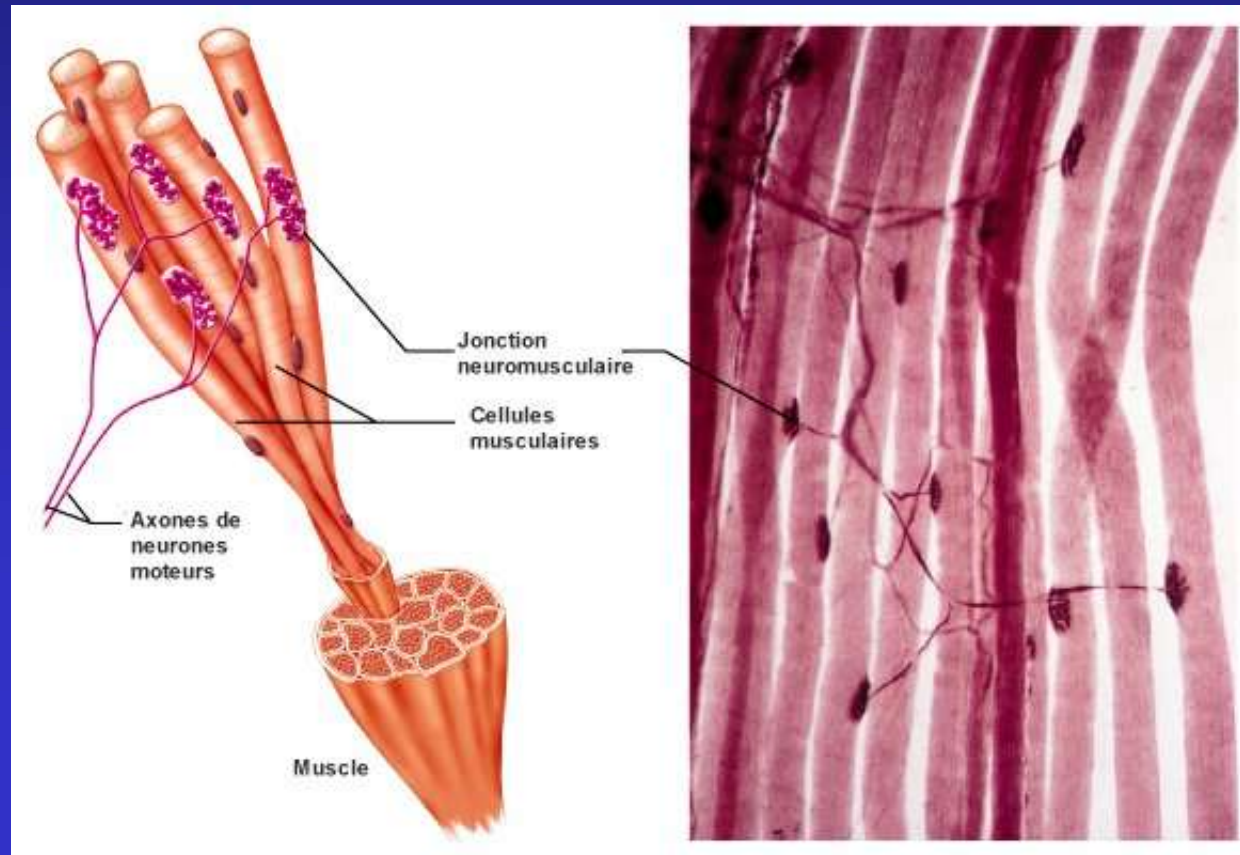
- ne peut faire effet que s'il se fixe à son récepteur.
- peut se fixer sur des récepteurs différents.
- éliminé par:
 - Dégradation par enzymes de la fente synaptique.
 - Recaptage par des cellules gliales ou par le bouton synaptique.
 - Diffusion hors de la fente synaptique

Quelques neurotransmetteurs

- Acétylcholine

Neurotransmetteur de nombreux neurones dans le SNC.

Neurotransmetteur des jonctions neuromusculaires.

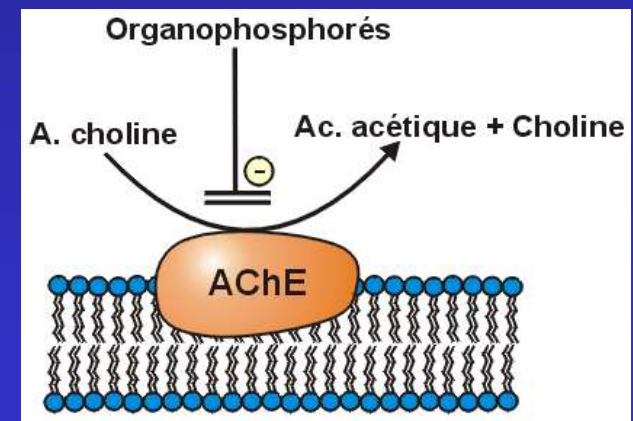


Ex. Élimination de l'acétylcholine

- Diffusion hors de la fente (peu)
- Dégradation par la cholinestérase (ou *acétylcholinestérase, AChE*)



Près de 50% de l'acétylcholine est détruit sans même avoir pu se fixer à un récepteur.



Les organophosphorés (insecticides, gaz de combat) sont des inhibiteurs de l'AChE

- Glutamate
- GABA (acide gamma amino-butyrique)
- Adrénaline et noradrénaline
- Dopamine
- Glycine
- Sérotonine
- Endorphines et enképhalines