

I – Potentiel électrique transmembranaire

A – Rappels sur le potentiel électrique membranaire de repos

Le **potentiel électrique membranaire** dépend de :

- 1/ la présence de canaux spécifiques du K^+ et du Na^+
- 2/ l'ouverture relativement plus importante des canaux spécifiques du K^+ que des canaux spécifiques du Na^+
- 3/ l'asymétrie de répartition du K^+ et du Na^+ entre le liquide cellulaire et le liquide extracellulaire maintenue par la pompe à sodium Na^+/K^+

Ce potentiel est de l'ordre de -80 mV (en moyenne).

Cette polarisation électrique est dite « de repos » car constante bien que les cellules soient en activité.

B – Variations du potentiel

a) Dépolarisation spontanée

Les cellules qui se dépolarisent **spontanément** jusqu'à une valeur seuil sont capables de **produire des rythmes**.

Elles sont nommées « **pace maker** » et possèdent des canaux dont la perméabilité augmente de manière rythmique.

Exemple : Les \mathcal{X} nodales donnant le rythme cardiaque, les plexus entériques à l'origine des contractions intestinales...

b) Potentiel d'action

Le **potentiel d'action** est la variation rapide et transitoire du **potentiel électrique membranaire**.

Le PA est une impulsion provoquée par la dépolarisation d'une cellule excitable.

Cellules excitables : certaines cellules se dépolarisent très rapidement lorsque leur potentiel électrique de membrane atteint une valeur seuil. Elles possèdent des canaux « voltage dépendant » dont la perméabilité augmente brutalement à cette valeur de potentiel électrique membranaire.

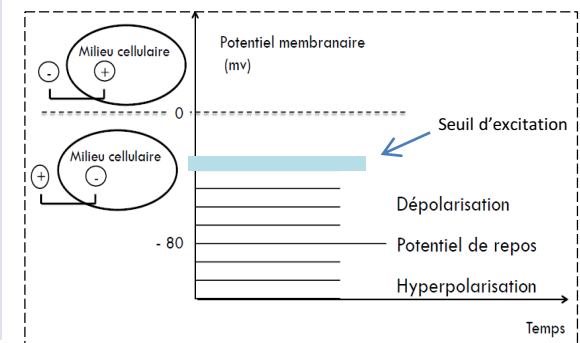
Exemples : cellules *pace maker*, neurone, cardiomyocyte, cellule musculaire striée ou lisse.

Ces cellules seront à l'origine d'un PA dont le rôle est de transmettre une information, un signal.

c) Dépolarisation et hyperpolarisation

Dépolarisation : le potentiel électrique membranaire se rapproche du potentiel nul (tend à devenir moins négatif).

Hyperpolarisation : le potentiel électrique membranaire s'éloigne du potentiel nul (tend à devenir plus négatif).



La modulation du potentiel membranaire concerne **toutes les cellules**.

C – Les 3 propriétés électriques des neurones*

Dépolarisation et hyperpolarisation = modification graduelle du potentiel électrique de membrane.

Excitation = production du potentiel d'action.

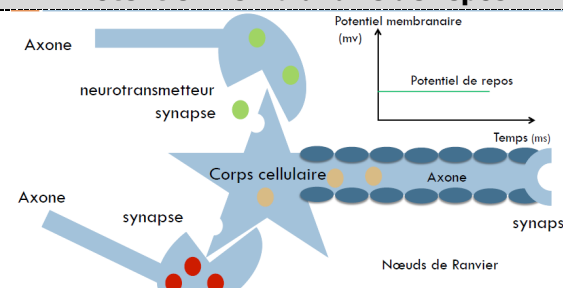
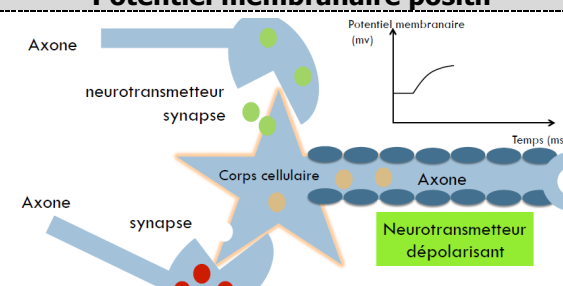
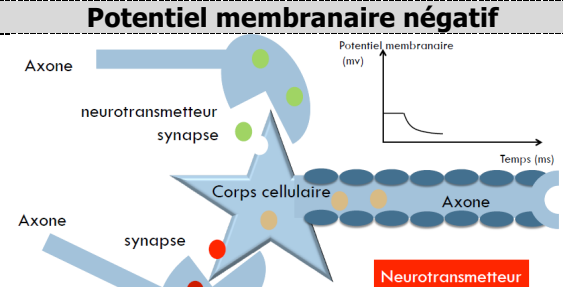
Conduction = propagation du potentiel d'action (axone).

* Certains neurones en ont 4 : dépolarisation spontanée (neurones « *pace maker* »)

II – Neurone : unité fonctionnelle du système nerveux

La reproduction d'un PA par le neurone suivant est conditionnée par **le type** de neurotransmetteur (excitateur ou inhibiteur) et par **la quantité** relarguée au niveau de la synapse.

A – Influence des neurotransmetteurs sur le potentiel électrique

Neurone au repos	Potentiel membranaire de repos
S'il ne reçoit pas de neurotransmetteur au niveau dendritique, le potentiel membranaire du neurone reste stable .	
Un neurotransmetteur excitateur va être dépolarisant . S'il n'est pas suffisant, le potentiel seuil n'est pas atteint. L'excitation n'est pas conduite et tout revient à la normale.	
Un neurotransmetteur inhibiteur va être hyperpolarisant . Le potentiel de membrane tend à être plus négatif, puis revient à la normale.	

B – Intégration neuronale

Capacité d'un neurone à recevoir des signaux en provenance d'autres neurones et à modifier son état en fonction de ces signaux.

- **Nature des signaux reçus :**
 - > Neurotransmetteurs libérés dans les synapses neuro-neurales
- **Nature de la modification neuronale induite par ces signaux :**
 - > Variation du potentiel membranaire du corps du neurone

a) Relation entre neurotransmetteur et polarisation électrique

Mécanisme direct ou canal ligand-dépendant	Mécanisme indirect
Ouverture ou fermeture d'un canal sous l'influence d'un neurotransmetteur qui se fixe sur le canal.	Ouverture ou fermeture d'un canal sous l'influence d'un neurotransmetteur qui se fixe sur un récepteur couplé à un ensemble de protéines intracellulaires (cascade de signalisation)

b) Ouverture et fermeture des canaux membranaires

Canaux ligand-dépendants	→ Sensibles à certaines <u>molécules</u> (=mécanisme direct)
Canaux pH-dépendants	→ Sensibles à l' <u>acidité</u>
Canaux mécano-sensibles	→ Sensibles à la <u>pression</u> (<i>proprioception/sensibilité extéroceptive</i>)
Canaux voltage-dépendants	→ Sensibles au <u>potentiel électrique</u>
Canaux ATP-dépendants	→ Sensibles au contenu cellulaire en ATP (∅ βdes îlots de Langerhans)

c) Canal ligand-dépendant

- *Montage patch-clamp (voir chap.3)*

Plus on concentre le ligand, plus le courant est intense : mise en évidence de la propriété de certains canaux à être ligand-dépendant. La capacité des neurones à intégrer tous les signaux chimiques dépendent de cette propriété.

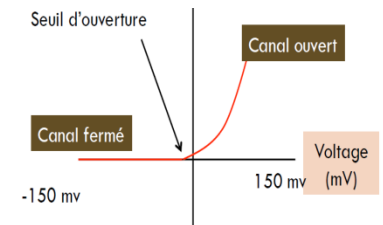
d) Les règles de l'intégration neuronale

Règle 1 : Réponse graduée	
Le potentiel de membrane est modifié graduellement selon l'effet des neuromédiateurs libérés au niveau de chaque insertion dendritique.	
Règle 2 : Sommation spatiale et temporelle	
Sommation spatiale	Sommation temporelle
<p>Les potentiels électriques liés à l'arrivée du/des neurotransmetteurs s'additionnent si un ou plusieurs neurotransmetteurs parviennent en des points différents du même corps neuronal.</p>	<p>Les potentiels électriques liés à l'arrivée du/des neurotransmetteurs s'additionnent si un neurotransmetteur parvient successivement dans le temps au même point du corps neuronal.</p>
Règle 3 : Propagation décrémenteille du potentiel	
L' intensité du potentiel électrique diminue lorsqu'on s'éloigne de sa zone d'intensité maximale sur le corps neuronal.	
Règle 4 : Propagation non orientée du potentiel	
Le potentiel électrique s'étend dans toutes les directions sur le corps neuronal, sans orientation possible.	

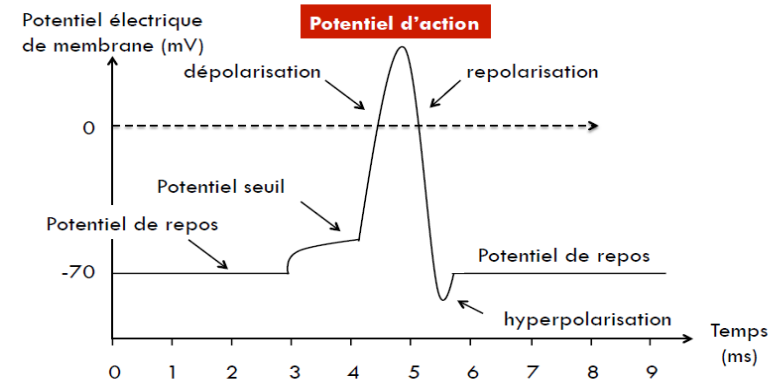
C – Conduction du potentiel d'action

a) Canaux voltage-dépendants

L'intensité du courant augmente « proportionnellement » avec la valeur du voltage. Les canaux finissent par s'ouvrir à partir d'un certain potentiel seuil d'ouverture alors qu'ils sont fermés pour un potentiel plus négatif.



b) Potentiel d'action (neurone et axone)



- ① Le potentiel de repos est modifié par l'action d'un neurotransmetteur dépolarisant (excitateur)
- ② Le potentiel seuil est atteint
- ③ Une dépolarisation est induite (zone ascendante du PA)
- ④ La repolarisation intervient après le maximum du PA (zone descendante du PA)
- ⑤ Hyperpolarisation
- ⑥ Retour au potentiel de repos

Deux types de canaux voltage-dépendants interviennent successivement pour générer un PA.

✿ Canal sodique voltage dépendant :

- Au **repos**, ces canaux sont **fermés**
- Dès que le **potentiel seuil** est atteint, ce sont les premiers mobilisés pour faire **entrer des charges +** dans le cytoplasme et entraîner une **dépolarisation**

*L'entrée du Na^+ est très rapide car sous l'effet du **gradient chimique** et **électrique**.*

- Ces canaux se **referment** après avoir **inversé la polarité** de la membrane, marquant la pointe du PA

✿ Canal potassique voltage dépendant :

- Pendant la **dépolarisation**, ces canaux sont **fermés**
- A la **pointe du PA**, ces canaux s'ouvrent et font **sortir des charges +** dans le milieu extracellulaire provoquant la **repolarisation**

La sortie du K^+ se fait rapidement en fonction du gradient chimique (principal cation cellulaire) et électrique.

- Ces canaux restent **ouverts un peu plus longtemps** provoquant une phase d'**hyperpolarisation**

La capacité d'une cellule à déclencher un PA **n'est pas** une propriété qui concerne toutes les cellules car **toutes les cellules n'ont pas de tels canaux voltage dépendants**. En revanche, toutes les cellules possèdent des canaux Na^+ et K^+ permettant de maintenir un potentiel de repos.

a) Les règles de la propagation du PA

L'**influx nerveux** désigne strictement la **propagation d'un PA** le long d'une fibre nerveuse.

Règle 1 : Tout ou rien

→ Pas de réponse graduée en fonction du stimulus

Un PA se propage le long de l'axone uniquement **si les variations du potentiel de membrane** au niveau de la **zone gâchette** (caractérisée par une forte densité en canaux sodiques voltage-dépendants ++ du neurone, située à la racine de l'axone) sont **supérieures à la valeur seuil**.

Règle 2 : Inexcitabilité périodique :

→ Pas de sommation spatiale ou temporelle des stimuli.

Les **périodes réfractaires** correspondent au temps nécessaire pour que les canaux voltage-dépendants retrouvent la conformation de repos qui leur confère leurs propriétés :

- > **Absolument réfractaire** : dépolarisé°, repolarisé°, hyperpolarisé°
- > **Relativement réfractaire** : retour au potentiel de repos

→ La période réfractaire explique que **la fréquence des PA peut atteindre un maximum**.

Règle 3 : Propagation non décrementielle du potentiel d'action :

→ Le potentiel d'action conserve son intensité initiale tout au long de son trajet axonal.

Le courant osmotique a 2 composantes dans l'axone :

- > **Cytoplasmique** : plus le **diamètre de l'axone** est grand, plus le potentiel d'action déclenché ponctuellement se transmet loin : **la conductance électrique du cytoplasme est proportionnelle au diamètre de l'axone**.
→ **Un gros axone conduit le potentiel d'action plus vite qu'un petit axone.**
- > **Membranaire** : plus la **surface axonale** est grande, plus il faut de temps pour la dépolariser : la surface de l'axone est proportionnelle à son diamètre
→ **La diminution de la surface excitable augmente la vitesse**

de propagation du potentiel d'action.

✳ Le rôle de la myéline et des nœuds de Ranvier :

→ **Diminution de la zone membranaire excitable** en empêchant localement la production de courant ionique

- > Un **gros axone myélinisé** conduit **plus vite** le potentiel d'action qu'un **petit axone myélinisé**.
- > Un **axone myélinisé** conduit **plus vite** qu'un **axone non myélinisé** (à diamètre égal).

Rq : Un axone myélinisé de 0,01 mm de diamètre conduit aussi vite qu'un axone de 0,5 mm de diamètre sans myéline (vitesse x 50).

✳ Conséquences physiologiques :

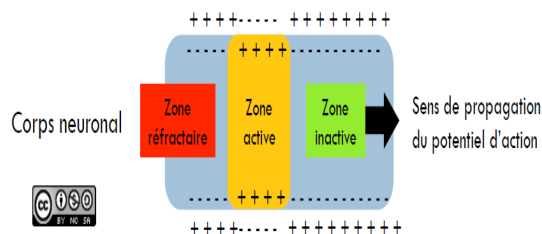
- **Fibres myélinisées** : ce sont principalement les fibres sensibles de la proprioception et de la commande motrice des muscles striés squelettiques
- **Fibres non myélinisées** : ce sont principalement les fibres sensibles du système nerveux viscéral

Règle 4 : Propagation orientée du potentiel :

→ la propagation du potentiel d'action le long de l'axone est unidirectionnelle.

La **zone active** est toujours une **zone réfractaire absolue** (le PA ne peut pas repartir en arrière) car les **canaux voltage-dépendants** doivent

recupérer leur **position initiale** pour être stimulant à nouveau.



Nucléoline

✳ Fréquence du potentiel d'action ++

L'intensité du signal est conditionnée uniquement par la fréquence avec laquelle l'axone transmet les PA

→ Il y a une **fréquence max déterminée par la période réfractaire**

L'équilibre osmotique des neurones ou des axones n'est **pas menacé** par ces mouvements ioniques, **même soutenus**.

III – Langage des neurones

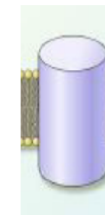
La **fréquence du PA code l'intensité du signal**, c'est le **seul mode d'expression** des neurones.

Capteur → Neurone sensoriel → Centre nerveux

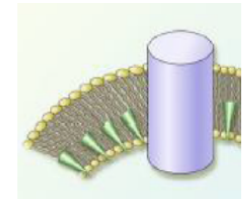
→ La **nature du signal** dépend de celle du **capteur** et des **centres nerveux** qui reçoivent les potentiels d'action du neurone sensoriel.

A – Signal mécanique ou thermique

Capteur = insert° de **canaux cationiques non sélectifs** dans la mb. Plasmique



Température = fluidité membranaire
→ modification des contraintes mécaniques exercées sur le canal



Pression sur la membrane
→ modification des contraintes mécaniques exercées sur le canal

On parle de « **canaux mécano-sensibles** » (la contrainte exercée provoque l'ouverture du canal et la transmission de l'information).

Ex : la température, la pression

Les **modifications des relations spatiales** entre le cytosquelette et les canaux calciques ou cationiques non sélectifs incorporés dans la membrane permettent leur ouverture, ce qui provoque une **dépolarisation**.

B – Codage et perception

Capteur → Neurone sensoriel → Centre nerveux

- ① Les **canaux cationiques** stimulés mécaniquement **dépolarisent** (ouverture) ou **hyperpolarisent** (fermeture) la membrane de la cellule qui les porte.
- ② Le neurone sensoriel perçoit les **variations de potentiel électrique** membranaire de la cellule et déclenche un **potentiel d'action**.
- ③ Le potentiel d'action parvient à un **centre nerveux** qui produit une **perception sensorielle**.

C – Discrimination sensorielle

$$\text{Discrimination} = \frac{\text{nb de neurones sensoriels}}{\text{nb de capteurs}} \leq 1$$

Discrimination optimale si rapport = 1

Discrimination sub-optimale si rapport < 1

Moins il y a de capteur pour un neurone donné, plus la discrimination est optimale.

D – Le mouvement : muscles striés squelettiques et neurone

a) Myocytes des muscles striés squelettiques

- ♥ **Cellules excitables**
- ♥ Dépolarisées par l'**acétylcholine** via une **synapse neuromusculaire** (=plaque motrice)

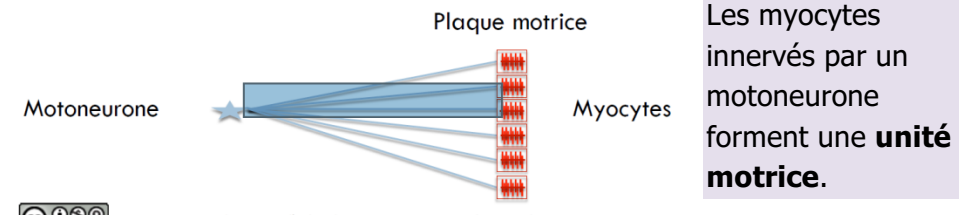
Nucléoline

Pr Favre

Rq : curares (antagonistes des rc à l'acétylcholine) → empêchent la contraction musculaire.

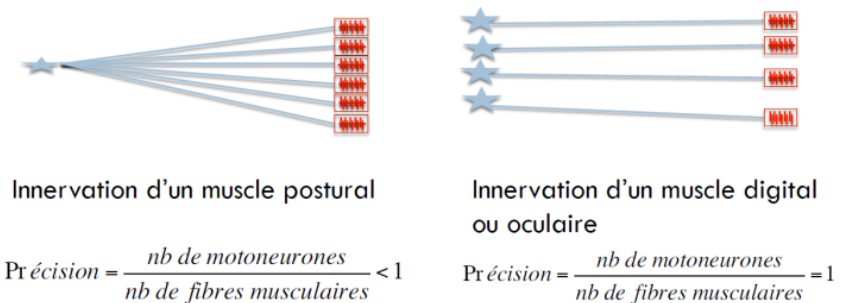
b) Unité motrice

Les fibres des muscles striés squelettiques sont commandées par un motoneurone qui se ramifie au sein de la **plaque motrice**. Chaque myocyte reçoit une ramification du motoneurone.



c) Précision du mouvement

$$\text{Précision} = \frac{\text{nb de motoneurones}}{\text{nb de fibres musculaires}}$$



d) Contraction des muscles striés squelettiques

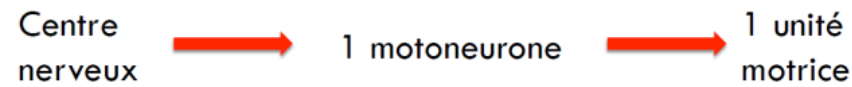
La **dépolarisation** de la membrane d'un myocyte entraîne la **contraction**. La contraction correspond au **glissement des myofibrilles** les unes sur les autres avec **consommation d'ATP**.

e) Particularités fonctionnelles des muscles striés squelettiques

♥ **Absence de période réfractaire** après le potentiel d'action du myocyte strié → plus on le stimule, plus il reste contracté.

♥ **La durée du PA musculaire est beaucoup plus importante que celle des motoneurones** (10 ms [muscle oculaire] à 100 ms [muscle postural]) VS 1ms motoneurone)

Le muscle est **incapable d'interrompre sa contraction périodiquement.**



La membrane peut restée dépolariée par l'action du motoneurone et la contraction peut se maintenir sans relaxation.

Volontairement

Involontairement

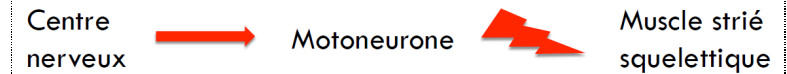
f) Contraction volontaire et involontaire

Contraction volontaire

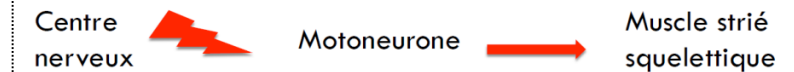
✳ **Contraction musculaire maximale** : recrutement de **toutes les unités motrices** d'une masse musculaire **sans relaxation**. Ex : haltérophilie

✳ **Contraction musculaire soutenue** : recrutement **successif** d'unités motrices d'une même masse musculaire. Ex : course d'endurance

Contraction involontaire (pathologie)



☠ **Tétanos** : émission à haute fréquence de potentiels d'action par les **motoneurones** sous l'effet de la toxine tétanique ayant pour effet une contraction incoercible des masses musculaires.
 → La membrane des myocytes reste dépolariée : la contraction se maintient
 → plus de ventilation car diaphragme figé
 → **pronostic vital engagé** (surveillance en réanimation ++)



⌘ **Epilepsie tonico-clonique** : émission à haute fréquence de PA par le fonctionnement aberrant des **centres nerveux** (phase tonique) puis diminution de fréquence (phase clonique), puis résolution spontanée.

♥ Dédicace à ma fillote Camille parce que je lui avait promis ♥