

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 ζ 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.

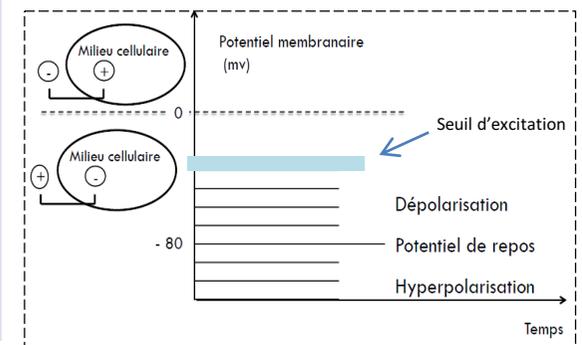
Exemples : cellules pace maker, neurone, cardiomyocyte, cellule musculaire striée ou lisse.

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.

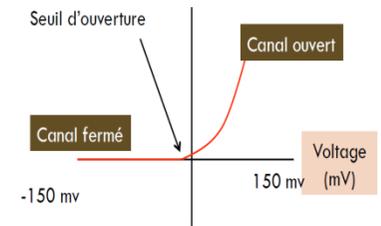
d) Les règles de l'intégration neuronale

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

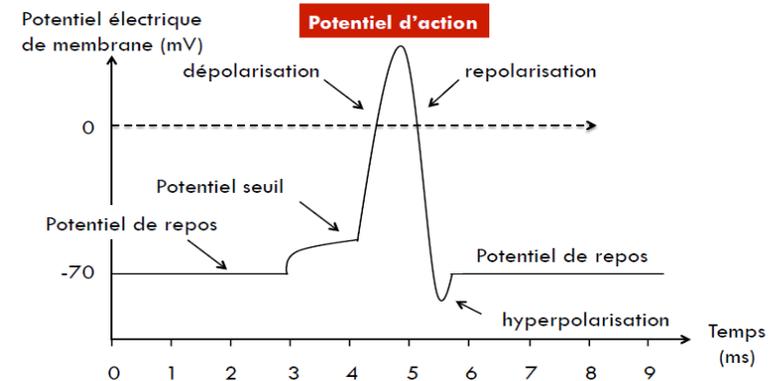
C – Conduction du potentiel d'action

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** : dépolarisat°, repolarisat°, hyperpolarisat°
- > **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 :

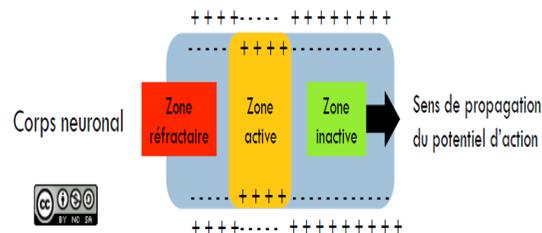
- **Fibres myélinisées** : ce sont principalement les fibres sensibles de la proprioception et de la commande motrice des muscles striés squelettiques
- **Fibres non myélinisées** : ce sont principalement les fibres sensibles du système nerveux viscéral

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

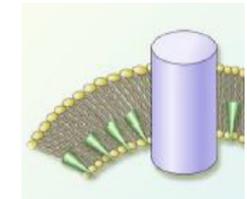
La **fréquence du PA code l'intensité du signal**, c'est le **seul mode d'expression** des neurones.

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^o de **canaux cationiques non sélectifs** dans la mb. Plasmique



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

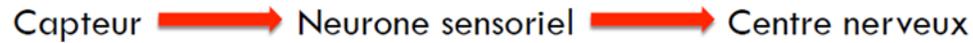
Pression sur la membrane
→ modification des contraintes mécaniques exercées sur le canal

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



- 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

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

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

Discrimination optimale si rapport = 1

Discrimination sub-optimale si rapport < 1

D – Le mouvement : muscles striés squelettiques et neurone

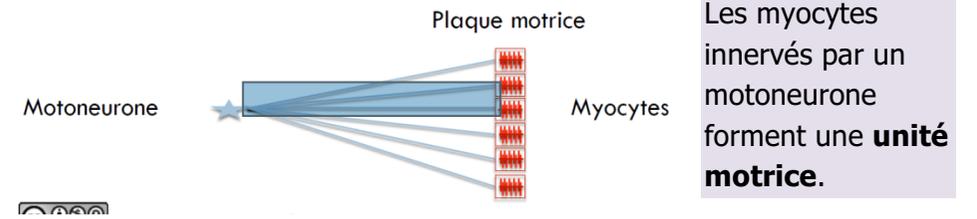
a) Myocytes des muscles striés squelettiques

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

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

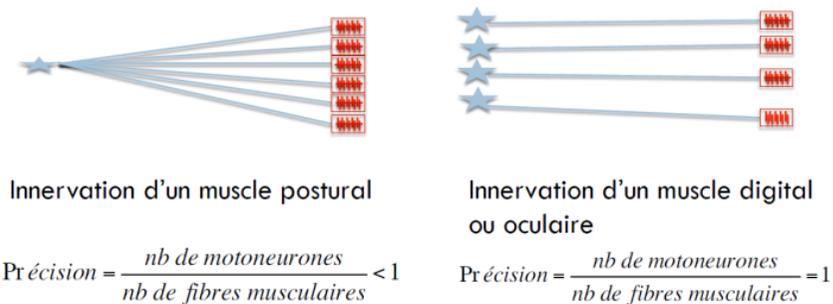
b) Unité motrice

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

$$Précision = \frac{nb\ de\ motoneurons}{nb\ de\ fibres\ musculaires}$$



d) Contraction des muscles striés squelettiques

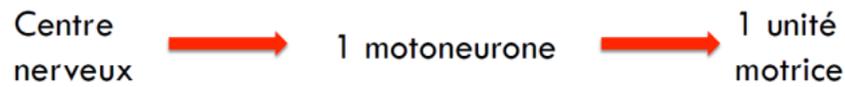
La **dépolarisation** de la membrane d'un myocyte entraîne la **contraction**. La contraction correspond au **glissement des myofibrilles** les unes sur les autres avec **consommation d'ATP**.

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

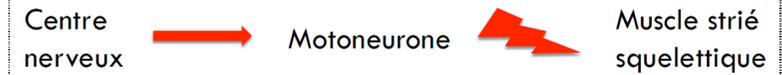
✳ **Contraction musculaire maximale :** recrutement de **toutes les unités motrices** d'une masse musculaire **sans relaxation**. Ex : *haltérophilie*

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

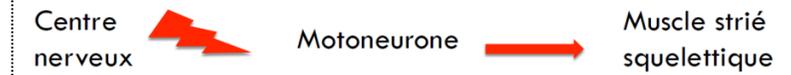
Nucléoline

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

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* ♥