

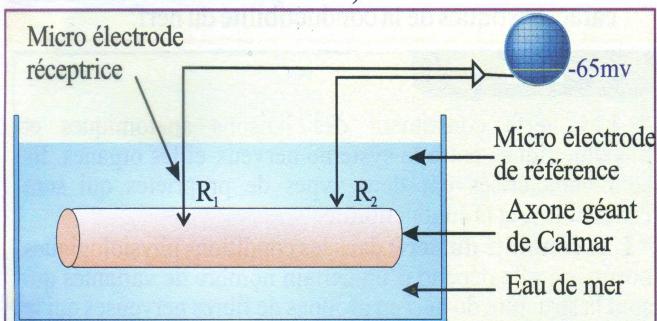
L'excitation efficace en un point du nerf au repos déclenche une inversion temporaire de la différence de potentiel, de part et d'autre de sa membrane, au point excité, qui se propage tout au long de ce nerf sous forme d'une onde de négativité, appelée onde de dépolarisation.

- Quel est l'état électrique de part et d'autre de la membrane du nerf (ou la fibre nerveuse) au repos?
- Quelle est son origine?
- Comment le message nerveux naît-il et se propage-t-il au niveau du nerf? Quelle est sa nature?

1. POTENTIEL MEMBRANAIRE DU NERF (OU LA FIBRE NERVEUSE) À L'ÉTAT DE REPOS.

1.1 - MISE EN ÉVIDENCE DU POTENTIEL DE REPOS:

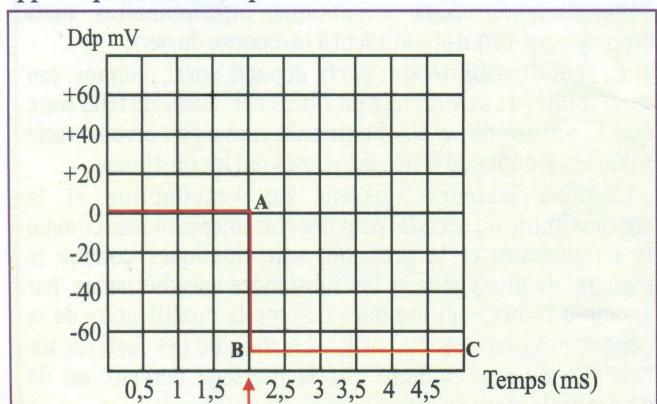
Pour mettre en évidence l'activité électrique du nerf au repos, de manière précise, on utilise, en plus des techniques d'expérimentation récentes, des outils très fins, comme les micromanipulateurs, et un support vivant favorable, par exemple des fibres nerveuses géantes de certains céphalopodes, comme le calmar, dont le diamètre de l'axon atteint 1 mm (1000 fois plus que le diamètre de la fibre nerveuse des mammifères).



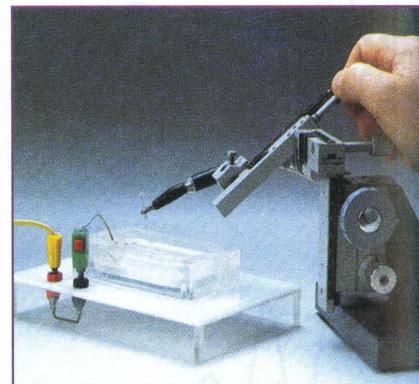
Doc.1: Montage expérimental mettant en évidence le potentiel de repos sur l'axone de Calmar.

En absence de toute excitation, on réalise les deux expériences suivantes :

- Au début, on place les deux micro-électrodes R_1 et R_2 à la surface de l'axone, on observe sur l'écran la ligne OA représentée sur la fig 2.
- Au temps t_1 , on introduit, progressivement, la micro-électrode R_1 à l'intérieur de l'axone (R_2 reste à la surface), on obtient la partie ABC, (sur le même enregistrement de la fig 2), qui désigne une différence de potentiel, entre l'intérieur et l'extérieur de l'axone qui atteint -65mV, appelée potentiel de repos.



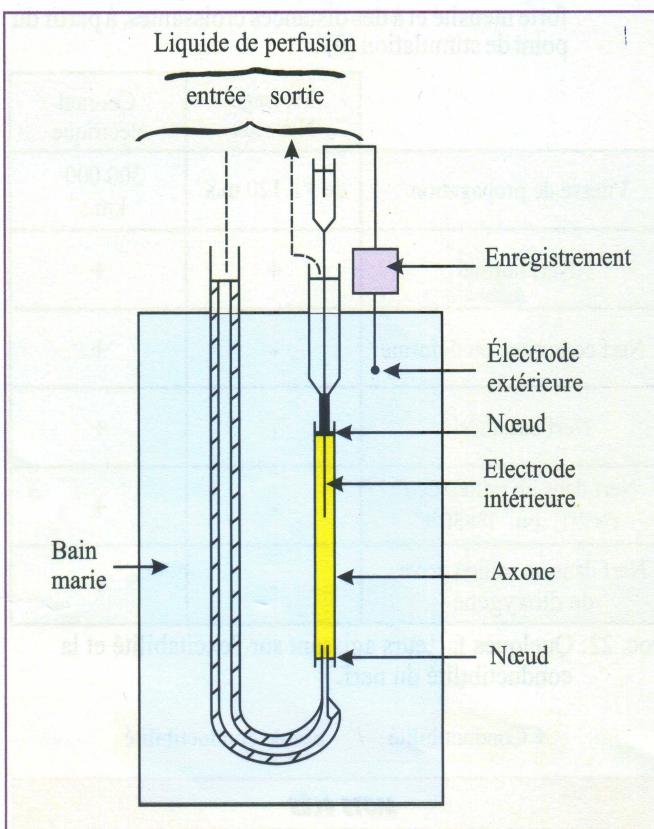
Doc 2: Représentation graphique du potentiel de repos.



Doc. 3: Micromanipulateur.

1.2 - ORIGINE DU POTENTIEL DE REPOS:

Pour connaître l'origine du potentiel de repos, on réalise l'expérience de l'axone perfusé :



Doc 4 : Expérience de l'axone perfusé (l'axone de calmar).

En vidant l'axone de son contenu cytoplasmique, il devient comme un tube vide de membrane cytoplasmique. Puis on le perfuse avec un liquide de même composition ionique que celle de son milieu intérieur et on le place après dans un milieu identique à son milieu extérieur. On enregistre une différence de potentiel électrique égale à son potentiel de repos (-65 mv).

Le tableau suivant représente la répartition des ions Na^+ et K^+ de part et d'autre de la membrane cytoplasmique de l'axone:

Ions	Intérieur de l'axone en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Extérieur de l'axone en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Potentiel d'équilibre
Na^+	50	440	+52mV
K^+	410	22	-75mV

Doc. 5: Concentration des principaux ions (Na^+ et K^+) intervenant dans la constance du potentiel de repos (en mg.L^{-1}).

Suivant les lois physiques, si la membrane qui sépare deux solutions des ions Na^+ et K^+ est semi perméable, ces ions seront soumis à deux types de forces :

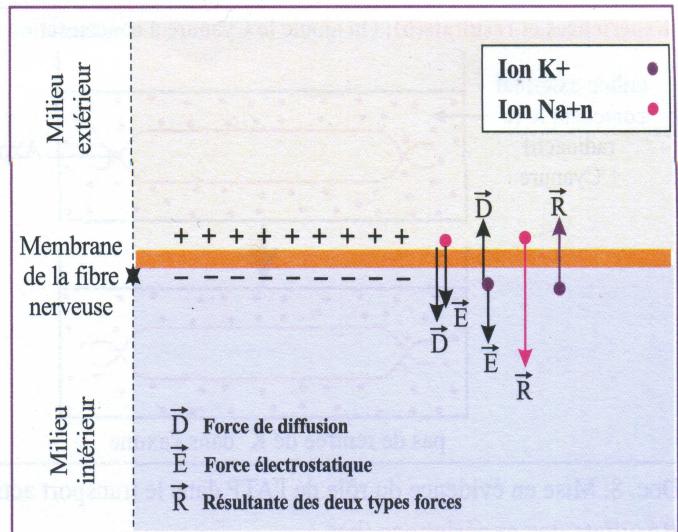
- + La force de diffusion, qui est due à la différence de concentration de ces ions entre l'intérieur et l'extérieur de l'axone.
- + La force électrostatique qui résulte des charges électriques des ions et de la différence de potentiel à laquelle elles sont soumises. Cette force permet le transport de ces ions d'un niveau de potentiel élevé à un niveau de potentiel bas.

La résultante de ces deux types de forces agit de manière passive en faisant entrer les ions Na^+ à l'intérieur de l'axone, mais aussi en faisant non seulement sortir les ions K^+ à l'extérieur, et ce suivant le gradient de concentration (suivant l'ordre décroissant de la concentration).

Potentiel d'équilibre: C'est la valeur du potentiel de chaque ion qui correspond à son équilibre de part et d'autre de la membrane. Cette valeur prend en considération, d'une part, sa concentration à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule; et d'autre part, sa charge électrique.

Transport passif: Transport qui, contrairement au transport actif, ne nécessite pas d'énergie.

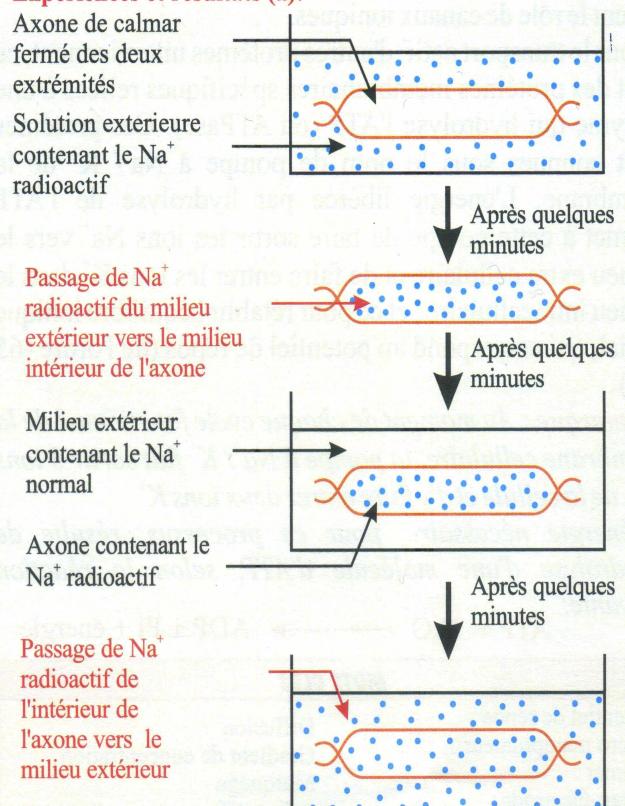
Marquage radioactif: Technique qui consiste à injecter une substance radioactive et de suivre son trajet par autoradiographie.



Doc. 6: Forces intervenant dans le transport passif des ions Na^+ et K^+ à travers la membrane de l'axone.

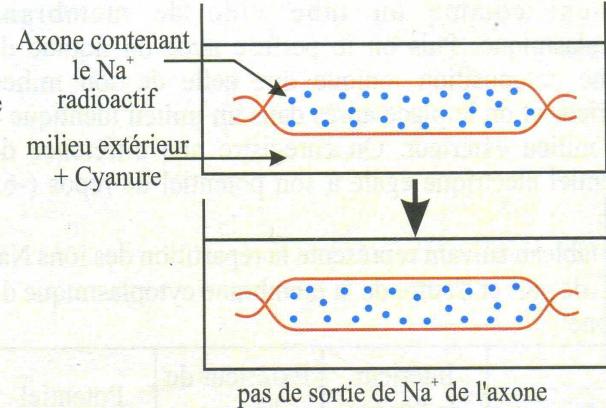
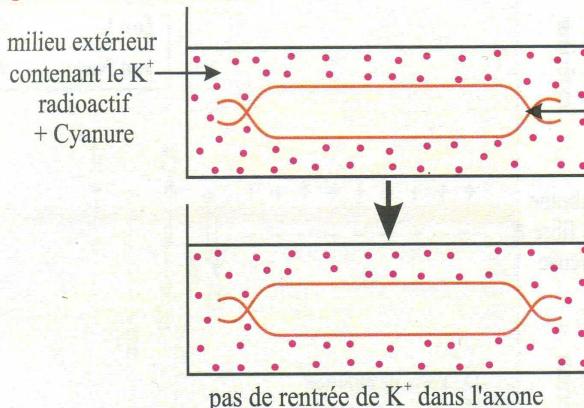
- Si les échanges d'ions Na^+ et K^+ se font uniquement par transport passif suivant le gradient de concentration, le potentiel de repos tend à disparaître progressivement, mais ce n'est pas le cas. Donc il existe un autre mécanisme qui agit pour conserver la différence de concentration des ions Na^+ et K^+ de part et d'autre de la membrane cytoplasmique.
- Pour mettre en évidence ce mécanisme, on propose d'étudier les résultats des expériences suivantes (fig 7 et 8).

Expériences et résultats (a):



Doc. 7: Mise en évidence de la perméabilité membranaire vis à vis des ions Na^+ , par la technique du marquage radioactif (on obtient les mêmes résultats avec les ions K^+).

Expériences et résultats(b): On ajoute le Cyanure à concentration 0.5 millimoles.L⁻¹, dans les conditions expérimentales suivantes :



Doc. 8: Mise en évidence du rôle de l'ATP dans le transport actif des ions Na⁺ et K⁺ (contre le gradient de concentration).

Résultats des expériences (b):

- Augmentation de la concentration des ions Na⁺ dans l'axone, et augmentation de la concentration des ions K⁺ à son extérieur.
- Diminution progressive du potentiel de repos, jusqu'à sa disparition totale, après quelques minutes.

1.3 - STRUCTURES MEMBRANAIRES RESPONSABLES DES ÉCHANGES D'IONS NA⁺ ET K⁺ AU MOMENT DU POTENTIEL DE REPOS:

De nombreuses recherches ont montré que les échanges d'ions Na⁺ et K⁺ à travers la membrane cellulaire à l'état de repos, se font par l'intermédiaire des protéines qui y sont intégrées.

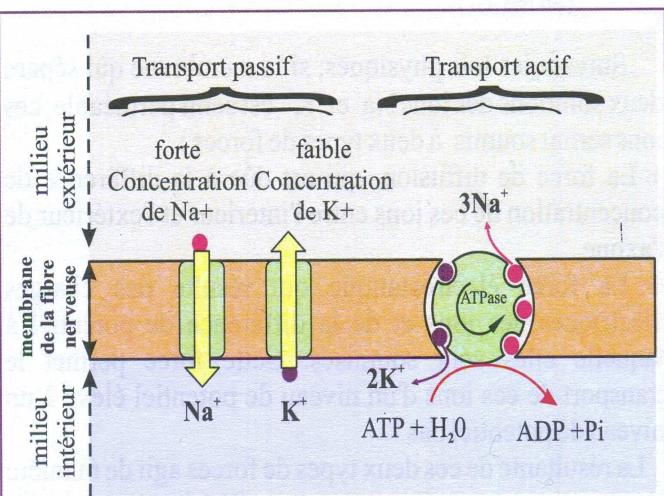
- Pour le transport passif, ou la diffusion, ces protéines jouent le rôle de canaux ioniques.
- Pour le transport actif, d'autres protéines interviennent, ce sont des protéines membranaires spécifiques reliées à une enzyme qui hydrolyse l'ATP (ou ATPase). Ces protéines sont connues sous le nom de pompe à Na⁺/K⁺ de la membrane. L'énergie libérée par hydrolyse de l'ATP permet à cette pompe de faire sortir les ions Na⁺ vers le milieu extra cellulaire et de faire entrer les ions K⁺ dans le milieu intracellulaire, et ce pour rétablir l'équilibre ionique initial, qui correspond au potentiel de repos (de l'ordre -65 mv).

Remarque : Au moment de chaque cycle fonctionnel de la membrane cellulaire, la pompe à Na⁺/K⁺ fait sortir 3 ions Na⁺ de la cellule et d'y faire entrer deux ions K⁺.

l'énergie nécessaire, pour ce processus, résulte de l'hydrolyse d'une molécule d'ATP, selon la réaction suivante:



Le Cyanure: Substance toxique qui bloque la synthèse de l'adénosine triphosphate (ATP), une substance qui emmagasine de l'énergie dans la cellule.



Doc. 9: Modèle explicatif des échanges ioniques membranaires à l'état de repos de la cellule.

EXPLOITATION DES DOCUMENTS

- 1- Décrire le montage expérimental mettant en évidence le potentiel de repos (Doc.1). ainsi que son enregistrement (Doc. 2).
- 2- Réaliser le schéma d'un axone en montrant la répartition des charges positives et négatives de part et d'autre de sa membrane.
- 3- Déduire la relation entre le potentiel de repos et la répartition des ions Na⁺ et K⁺ dans les milieux intra et extra cellulaires (Doc. 4, 5 , et 6).
- 4- Expliquer la différence de répartition des ions Na⁺ et K⁺ de part et d'autre de la membrane cellulaire (doc 7, 8 et pré-acquis).
- 5-A partir de vos connaissances et du doc 9, formuler une synthèse concernant l'origine du potentiel de repos .

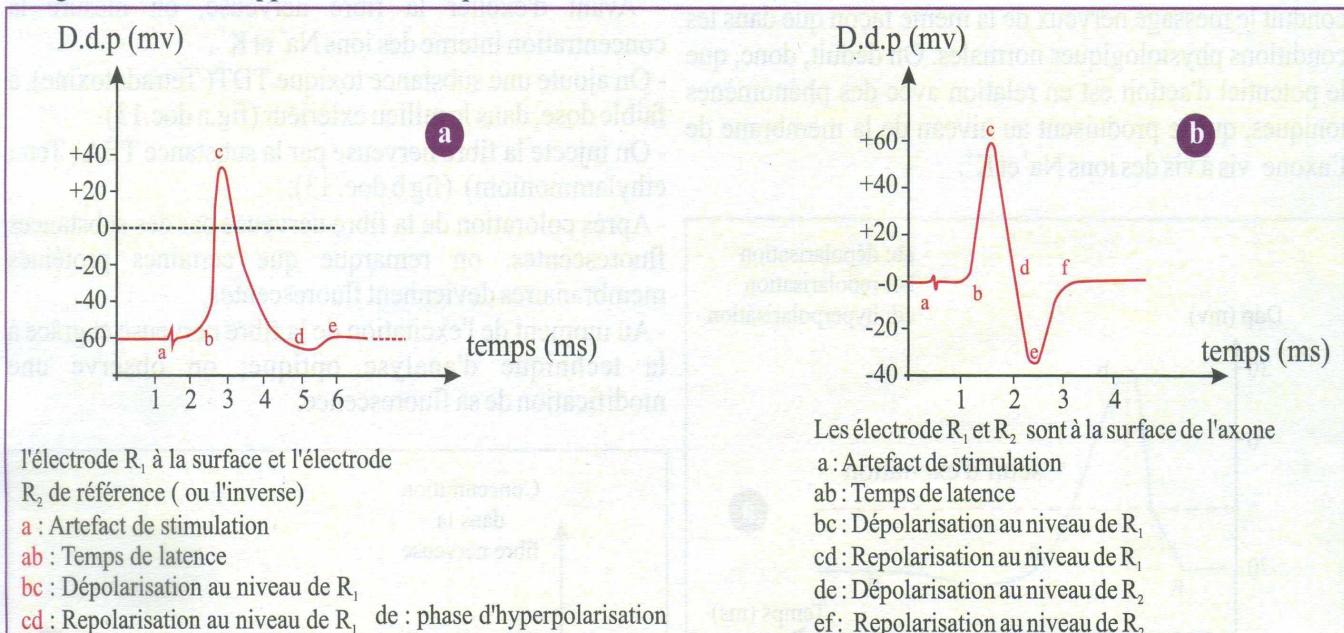
MOTS CLÉS

Potentiel de repos	Diffusion
Micro manipulateur	Gradient de concentration
Calmar	Marquage
Micro-électrode	radioactif
Axon	Potentiel d'action
Potentiel d'équilibre	Potentiel membranaire
Electrostatique	Pompe

2. NATURE ET NAISSANCE DU MESSAGE NERVEUX.

2. 1 - MISE EN ÉVIDENCE DU POTENTIEL D'ACTION:

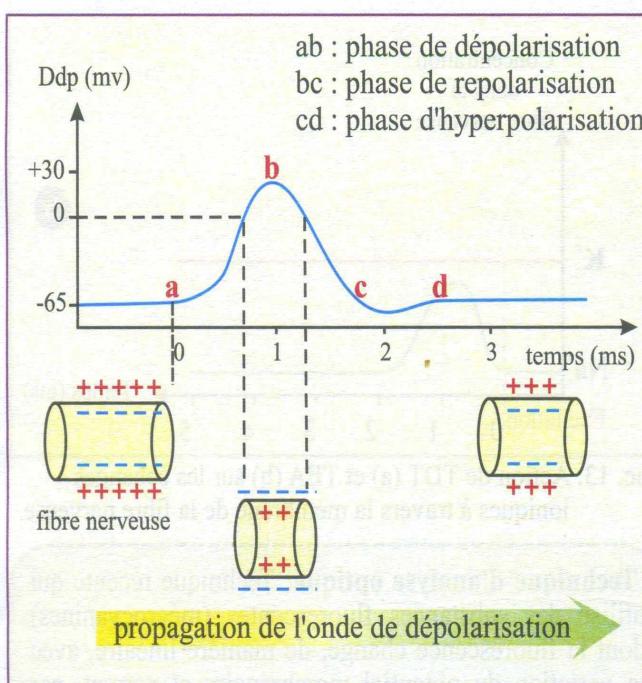
On peut enregistrer l'activité électrique du nerf (ou la fibre nerveuse) à la suite d'une excitation, en utilisant les dispositifs expérimentaux déjà cités (oscilloscope ou EXAO). La forme des enregistrements obtenus varie selon l'emplacement des électrodes réceptrices et les électrodes excitatrices sur le nerf (ou la fibre nerveuse). Ces enregistrements sont appelés courbes de potentiel d'action.



Doc. 10: Potentiel l'action monophasique (a) et diphasique (b).

L'excitation du nerf (ou la fibre nerveuse), donne naissance à un message nerveux, au point excité, qui se propage tout au long de ce dernier, sous forme d'une onde de négativité. Lorsque cette onde arrive à l'électrode réceptrice R_1 ou R_2 , elle crée, entre elles, une différence de

potentiel. Cette étape est appelée phase de dépolarisation par rapport à R_1 ou R_2 (phase bc et de). Lorsque cette onde quitte R_1 ou R_2 , il y aura rétablissement du potentiel membranaire de repos. Cette étape est appelée phase de repolarisation par rapport à R_1 ou R_2 (phase cd et ef).



Doc. 11: Variations de la polarisation membranaire au moment des phases du potentiel d'action monophasique.

EXPLOITATION DES DOCUMENTS

- 1-Comparer les deux enregistrements (a et b) du document 10 .
- 2-déduire une définition du potentiel d'action.
- 3- En exploitant le document 11:
 - a- Décrire comment se repartissent les charges ioniques de part et d'autre de la membrane cellulaire au moment des phases du potentiel d'action.
 - b- Proposer une explication à cette répartition .

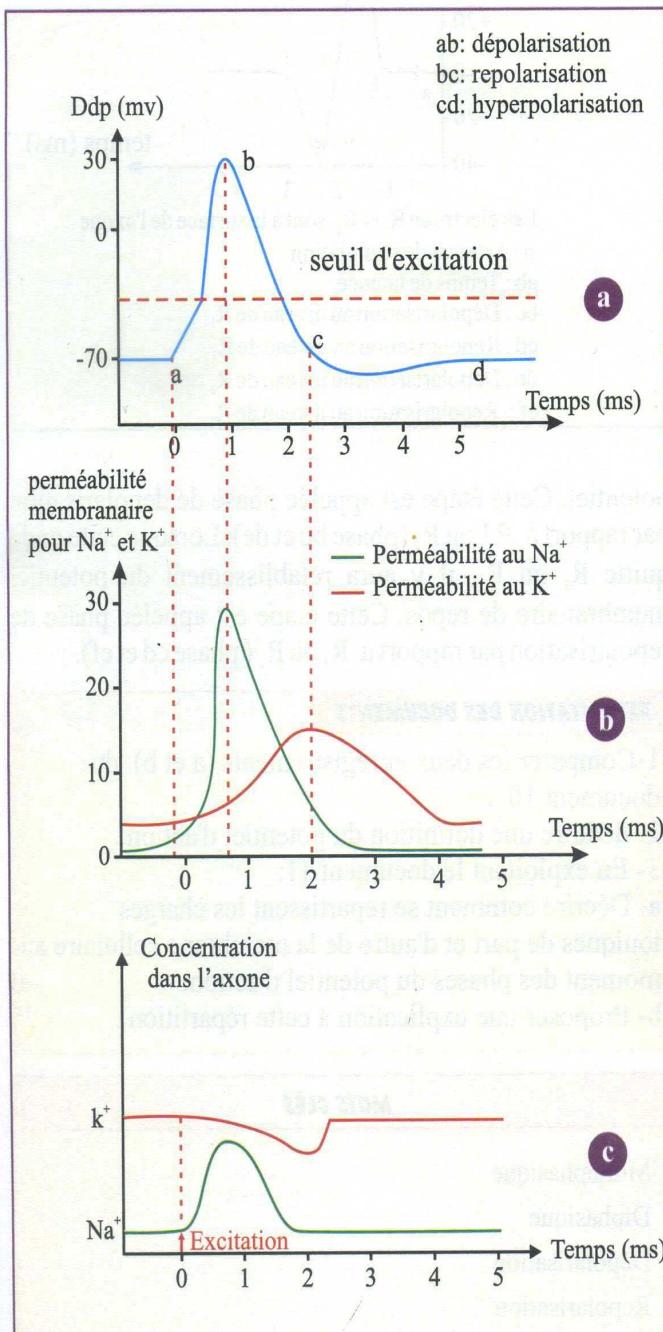
MOTS CLÉS

Monophasique
Diphasique
Dépolarisation
Repolarisation
Hyperpolarisation
Temps de latence

2.2 - ORIGINE ET NAISSANCE DU MESSAGE NERVEUX:

Pour mettre en évidence l'origine du message nerveux, on réalise l'expérience de l'axone perfusé. principe de l'expérience et résultats :

On vide l'axone de calmar de son contenu cytoplasmique, puis on le perfuse avec une solution ionique de même composition que le cytoplasme. On remarque que l'axone conduit le message nerveux de la même façon que dans les conditions physiologiques normales. On déduit, donc, que le potentiel d'action est en relation avec des phénomènes ioniques, qui se produisent au niveau de la membrane de l'axone vis à vis des ions Na^+ et K^+ .

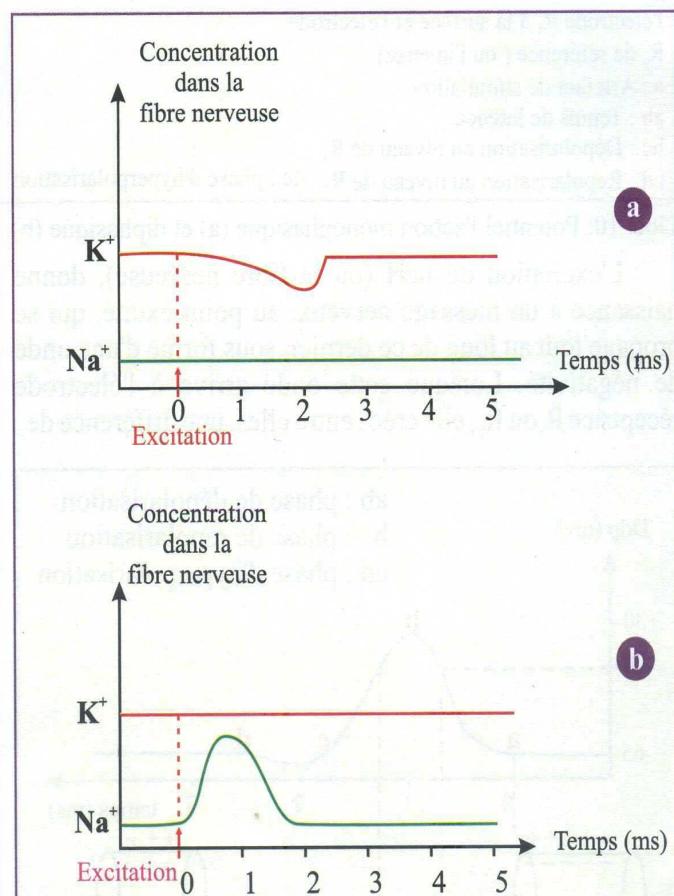


Doc. 12: Phases de potentiel d'action monophasique (a), variation de la perméabilité membranaire aux ions Na^+ et K^+ (b) et leurs concentrations dans l'axone (c).

2.3 - LES STRUCTURES MEMBRANAIRES RESPONSABLES DES ÉCHANGES IONIQUES AU MOMENT DU POTENTIEL D'ACTION.

De nombreuses expériences ont été réalisées pour mettre en évidence les structures membranaires responsables de la variation de répartition des ions à travers la membrane cellulaire au moment du potentiel d'action. Parmi ces expériences, on cite les étapes de l'expérience suivante :

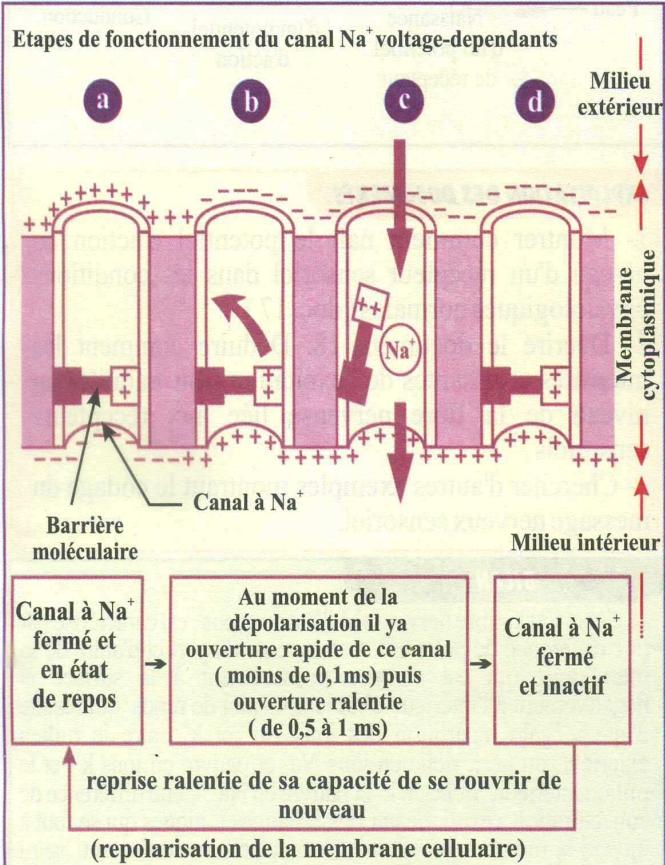
- Avant d'exciter la fibre nerveuse, on mesure la concentration interne des ions Na^+ et K^+ .
- On ajoute une substance toxique TDT (Tetradotoxine), à faible dose, dans le milieu extérieur (fig. a doc. 13)
- On injecte la fibre nerveuse par la substance TEA (Tetra ethylammonium) (fig b doc. 13).
- Après coloration de la fibre nerveuse par des substances fluorescentes, on remarque que certaines protéines membranaires deviennent fluorescentes.
- Au moment de l'excitation de la fibre nerveuse et grâce à la technique d'analyse optique; on observe une modification de sa fluorescence.



Doc. 13: Action de TDT (a) et TEA (b) sur les échanges ioniques à travers la membrane de la fibre nerveuse.

Technique d'analyse optique: Technique récente qui utilise des substances fluorescentes (mécrocyanines) dont la fluorescence change, de manière linéaire, avec la variation du potentiel membranaire et permet, par conséquent, l'étude des structures cellulaires très fines, sans utiliser des microélectrodes qui peuvent les abîmer.

Les Protéines membranaires spécifiques responsables de la variation de la perméabilité membranaire vis-à-vis des ions Na^+ et K^+ , au moment du potentiel d'action, sont des canaux à Na^+ et K^+ qui fonctionnent sous l'action de la différence de potentiel électrique membranaire locale provoquée par l'excitation. On les appelle canaux voltage-dépendants, ils nécessitent moins d'énergie que la pompe à Na^+/K^+ .



Doc. 14: Mécanisme de fonctionnement des canaux membranaires à Na^+ voltage-dépendants.

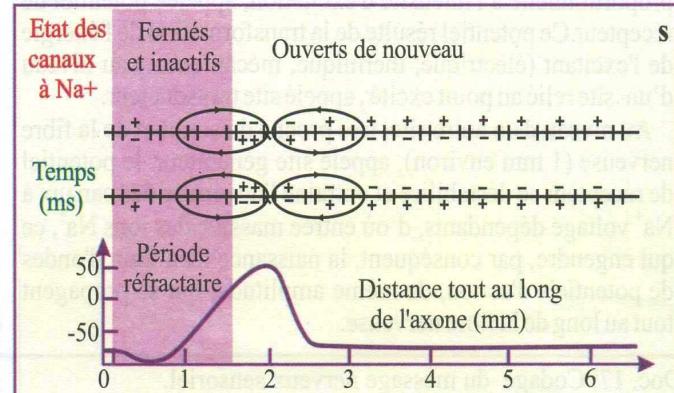
- Au repos, la plupart des canaux à Na^+ voltage-dépendants sont fermés et servent de barrière contre le passage des ions Na^+ , et ce à cause de la conformation de leur molécules protéiques (conformation dite fermée).

- Au moment de la dépolarisation, la conformation de ces molécules change, d'où leur déplacement et ouverture rapide des canaux, ce qui entraîne une entrée massive des ions Na^+ . Après, ces canaux à Na^+ se ferment, deviennent inactifs et ne peuvent se rouvrir que si le potentiel membranaire revient à sa valeur initiale.

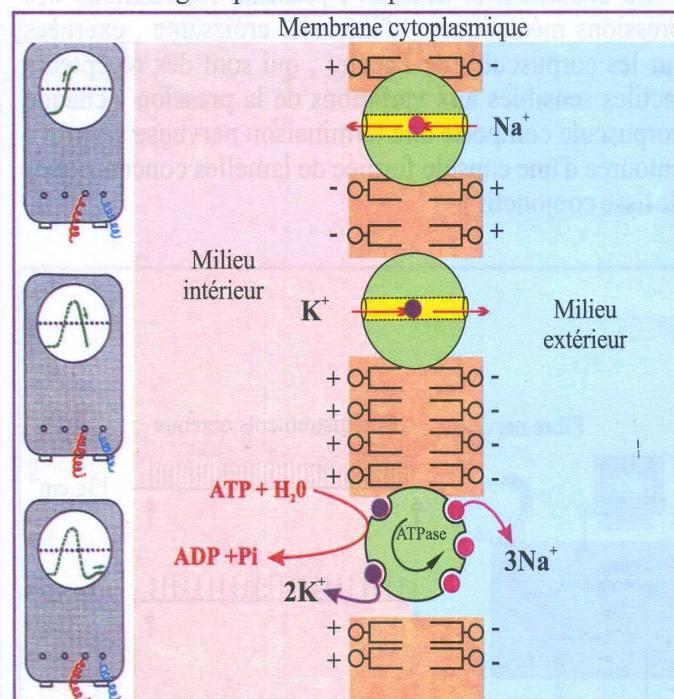
- Au moment de la fermeture des canaux à Na^+ voltage-dépendants, l'ouverture des canaux à K^+ commence (sortie de K^+). Mais, contrairement aux canaux à Na^+ , leur ouverture persiste aussi longtemps tant que la membrane n'est pas dépolarisée de nouveau. On les appelle canaux à K^+ à ouverture retardée. celle-ci permet la repolarisation de la membrane.

- La fermeture des canaux à Na^+ voltage-dépendants et leur retour à l'état d'inactivation, coïncident avec la période réfractaire qui accompagne l'onde de dépolarisation et au cours de laquelle la fibre nerveuse ne peut ni engendrer ni propager un potentiel d'action.

- L'hyperpolarisation (2 à 3 ms), correspond au temps pendant lequel la pompe Na^+/K^+ rétablit l'excès de Na^+ dans le milieu extracellulaire et l'excès de K^+ dans le milieu intracellulaire. Ce qui permet de revenir au potentiel membranaire de repos.



Doc. 15: Synchronisation de la fermeture des canaux à Na^+ voltage dépendants et la période réfractaire.



Doc. 16: Modèle explicatif des échanges ioniques vis à vis des ions (Na^+ et K^+) pendant et après le potentiel d'action.

EXPLOITATION DES DOCUMENTS

1- Décrire les figures a, b et c du doc .12 . Déduire la relation entre le potentiel d'action et la variation de la perméabilité de la membrane cellulaire aux ions Na^+ et K^+ .

2- A partir de vos connaissances et l'exploitation des doc 13, 14, 15 et 16, déduire l'origine et la nature du message nerveux .

MOTS CLÉS

Fluorescente
Analyse optique

Canal voltage dépendants

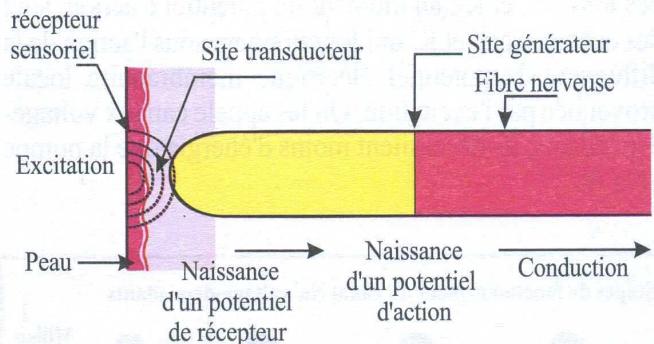
2. 4 - NAISSANCE DU MESSAGE NERVEUX AU NIVEAU DES RÉCEPTEURS SENSORIELS : Codage du message nerveux sensoriel

L'excitation d'un récepteur sensoriel, donne naissance à une différence de potentiel électrique, dont l'amplitude est proportionnelle à l'intensité d'excitation, appelée potentiel de récepteur. Ce potentiel résulte de la transformation de l'énergie de l'excitant (électrique, thermique, mécanique...) au niveau d'un site relié au point excité, appelé site transducteur.

Au niveau d'un autre site, très proche du sommet de la fibre nerveuse (1 mm environ), appelé site générateur, le potentiel de récepteur se déstabilise et entraîne l'ouverture des canaux à Na^+ voltage dépendants, d'où entrée massive des ions Na^+ , ce qui engendre, par conséquent, la naissance d'un train d'ondes de potentiels d'action, de même amplitude, qui se propagent tout au long de la fibre nerveuse.

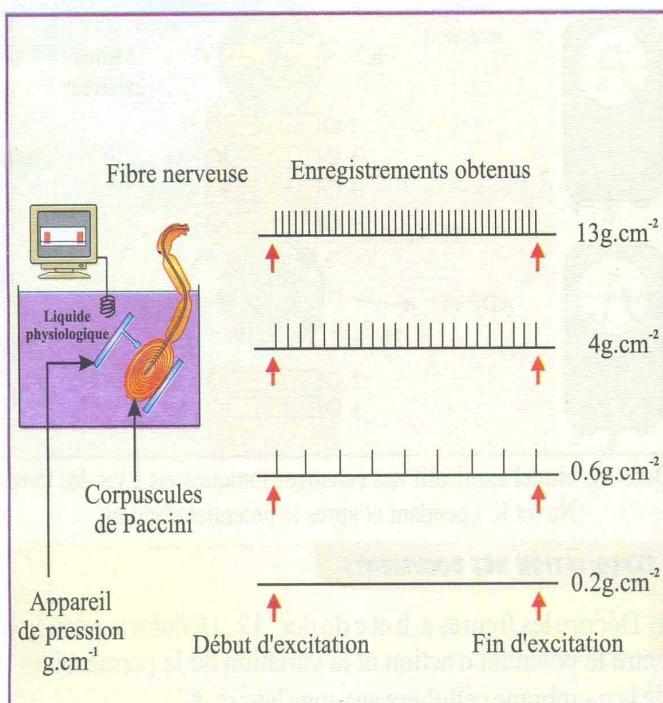
Doc. 17: Codage du message nerveux sensoriel.

Le document ci dessous, présente les résultats des pressions mécaniques, d'intensité croissante, exercées sur les corpuscules de Paccini, qui sont des récepteurs tactiles sensibles aux variations de la pression (chaque corpuscule comporte une terminaison nerveuse sensible entourée d'une capsule formée de lamelles concentriques de tissu conjonctif).



EXPLOITATION DES DOCUMENTS

- Montrer comment naît le potentiel d'action au niveau d'un récepteur sensoriel dans les conditions physiologiques normales (doc. 17).
- Décrire le document 18. Déduire comment les intensités croissantes de l'excitation sont traduites au niveau de la fibre nerveuse liée aux récepteurs sensoriels.
- Chercher d'autres exemples montrant le codage du message nerveux sensoriel.



Doc.18: Codage d'un message nerveux par l'intermédiaire de chaînes d'ondes de potentiel d'action .

BILAN

Le nerf (ou la fibre nerveuse) à l'état de repos, est caractérisé par une différence de potentiel permanente de part et d'autre de sa membrane, qui est chargée positivement à la surface et négativement à l'intérieur, c'est le potentiel de repos qui résulte d'une inégale répartition des ions Na^+ et K^+ entre le milieu extérieur, du nerf, riche en ions Na^+ et pauvre en ions K^+ , et le milieu intérieur, riche en K^+ et pauvre en Na^+ . Cette différence de concentration s'explique par des échanges ioniques qui se font à travers la membrane cellulaire, considérée comme étant semi perméable, et qui est le siège de deux types de transport:

* Un transport passif, qui se fait selon le gradient décroissant de la concentration, par l'intermédiaire des protéines intégrées dans la membrane cellulaire.

* Un transport actif, qui se fait contre le gradient de concentration, par des protéines membranaires spécifiques connues sous le nom de pompe à Na^+/K^+ , qui nécessite de l'énergie.

* L'excitation efficace du nerf (ou la fibre nerveuse) en un point précis, provoque une inversion temporaire de la différence de potentiel, de part et d'autre de la membrane cellulaire, appelée potentiel d'action, qui se propage sous forme d'une onde de négativité, tout au long du nerf, en formant le message nerveux.

* La naissance du potentiel d'action et sa propagation sont liées à la variation de la perméabilité membranaire vis à vis des ions Na^+ et K^+ , qui entraîne, à son tour, une variation de leur répartition de part et d'autre de cette membrane. Et ce grâce à l'existence des canaux ioniques spécifiques à Na^+ et à K^+ , appelés canaux voltage-dépendants, qui assurent, au moment de leur ouverture, une entrée massive de Na^+ et sortie de K^+ .

Après le passage du message nerveux, la pompe à Na^+/K^+ fonctionne, de manière active, pour rendre la membrane à son état de repos.

MOTS CLÉS

Potentiel de récepteur

Site transducteur

Site générateur