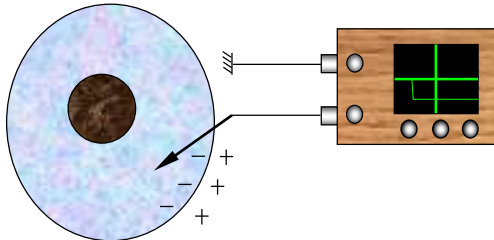


Potentiel d'action et synapse

1. Le potentiel de repos

Chaque cellule possède une **différence de potentiel transmembranaire** ; c'est une tension électrique due à la répartition inégale des charges de part et d'autre de la membrane plasmique : les nombreuses protéines chargées négativement à l'intérieur du cytoplasme et les nombreux cations à l'extérieur de la cellule engendrent une différence de potentiel transmembranaire négative appelée aussi **potentiel de repos** que l'on peut mesurer en plaçant l'extrémité d'une microélectrode dans le cytoplasme et qui s'exprime en mV. Pour une cellule nerveuse cette différence de potentiel (ddp) transmembranaire vaut - **70 mV** mais cette valeur dépend des cellules (une cellule végétale a une ddp de - 90 mV).

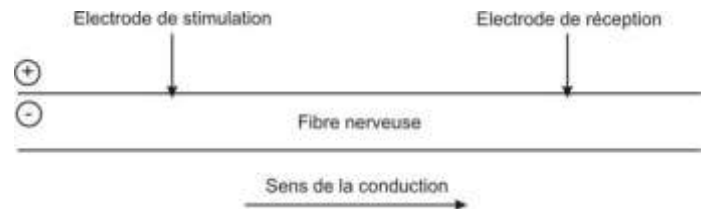


S'il est important de comprendre qu'il y a davantage de charges négatives dans le cytoplasme qu'à l'extérieur, il est tout aussi important de noter que, concernant les ions K^+ , ces derniers sont, en revanche, bien plus concentrés dans le cytoplasme qu'à l'extérieur de la cellule, et inversement pour les ions Na^+ . Ce sont ces deux cations qui sont impliqués dans la naissance des potentiels d'action dans les neurones.

Voir l'animation flash : [potentiel de repos](#)

2. Le potentiel d'action (d'après le site [Université Lille 1, Sciences et Technologies](#))

Il faut, pour mettre en évidence un **potentiel d'action (PA)**, générer une activité dans le neurone ce qui, une fois de plus, est beaucoup plus facile à réaliser sur une fibre in vitro que sur un neurone entier in situ. En pratique, on utilise un générateur d'impulsions électriques qui permet d'envoyer des chocs calibrés et paramétrés en temps et en intensité vers la fibre par l'intermédiaire d'une électrode de surface ou d'une microélectrode intracellulaire située à quelque distance de l'électrode réceptrice.

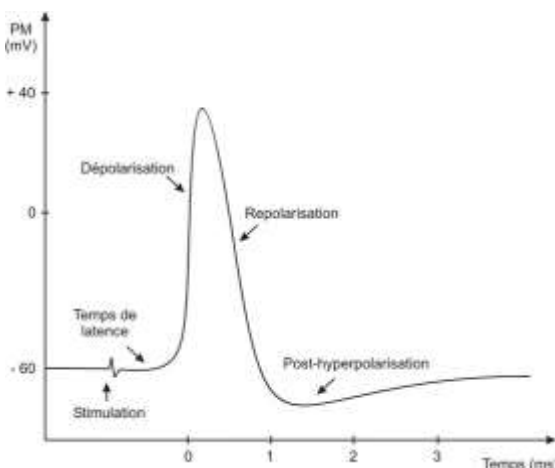


Deux cas de figure peuvent alors se produire.

- Si la stimulation appliquée tend à rendre l'intérieur de la fibre encore plus négatif, on constate simplement une augmentation du potentiel de repos qui se traduit par une **hyperpolarisation** (ddp encore plus négative) qui reste locale et qui ne se propage pas.
- Par contre si la stimulation appliquée entraîne une diminution du potentiel de repos qui se traduit par une **dépolarisation** (ddp moins négative), on constate à partir d'un **seuil critique** l'apparition d'un **potentiel d'action** qui se propage dans la fibre et que l'on peut enregistrer après un temps de latence en raison du temps que met la dépolarisation pour atteindre l'électrode de réception.

Il faut noter que si l'apparition du potentiel d'action est liée à l'intensité de la stimulation, une fois le seuil critique atteint, il est immédiatement maximal. Son amplitude et sa durée dépendent du tissu et de l'espèce mais sont, tout comme le potentiel de repos, constantes pour un type cellulaire donné chez une espèce donnée. En effet, soit l'intensité de stimulation est insuffisante pour atteindre le seuil critique – on dit qu'elle est **infraliminaire** – et le potentiel d'action n'apparaît pas, soit l'intensité de stimulation est suffisante pour atteindre le seuil critique – on dit qu'elle est **supraliminaire** – et le potentiel d'action est immédiatement maximal. On dit que la fibre obéit à la **loi du tout ou rien**. Ce potentiel, qui correspond à une modification temporaire de la polarité membranaire comprend trois phases :

Document 1 : le potentiel d'action

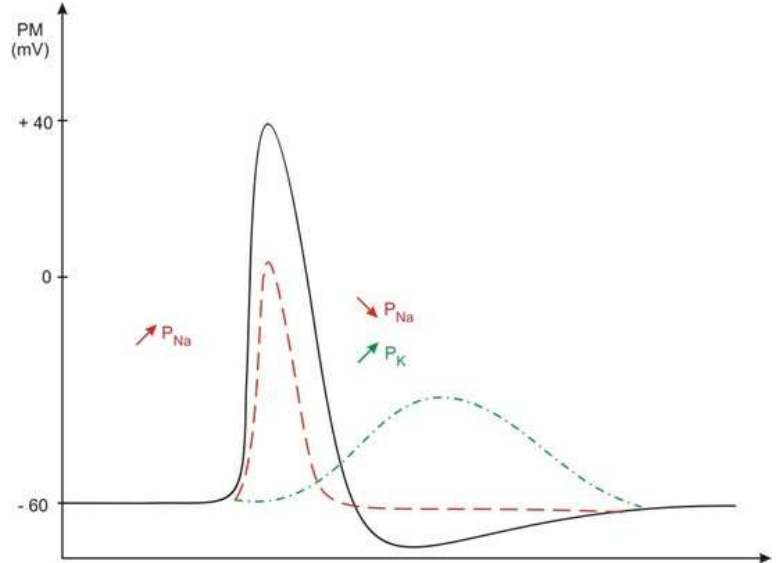


- une première phase de **dépolarisation** extrêmement brève puisqu'elle ne dure qu'une fraction de milliseconde et qui se traduit par une brusque inversion du potentiel de membrane (on passe en moyenne de - 60 mV à + 40 mV) ;
- une seconde phase de **repolarisation** un peu plus lente qui permet au potentiel de membrane de revenir à son niveau de repos ;

- une troisième phase de (post-)hyperpolarisation encore plus lente (plusieurs millisecondes) et de très faible amplitude pendant laquelle les concentrations ioniques intracellulaires retrouvent leurs valeurs initiales.

Document 2 : modification de la conductance de Na⁺ et K⁺ lors d'un PA

Ce sont en effet des mouvements de sodium et de potassium qui sont à l'origine des différentes phases du potentiel d'action. Au repos, la perméabilité membranaire (ou conductance) au sodium (P_{Na}) est très faible car la plupart des canaux au sodium sont fermés. Or, ces canaux étant sensibles au potentiel de membrane (on dit qu'ils sont électrodépendants ou voltage-dépendants), une légère dépolarisation suffit à provoquer leur ouverture. Les ions sodium rentrent alors massivement dans la cellule en raison de leur gradient de concentration et de leur gradient électrique ce qui augmente la dépolarisation et finit par inverser le potentiel de membrane qui atteint une valeur d'environ +40 mV.

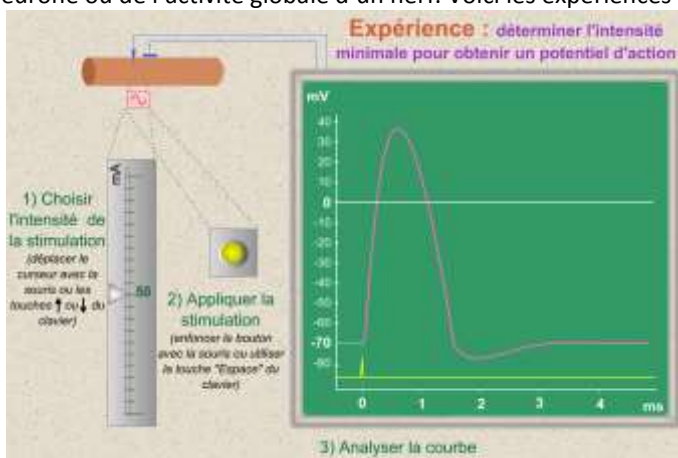


Cette forte dépolarisation finit par inactiver les canaux au sodium mais induit l'ouverture de canaux au potassium, également électrodépendants, ce qui a pour effet d'augmenter la perméabilité au potassium (P_K). Les ions potassium, beaucoup plus nombreux à l'intérieur qu'à l'extérieur, quittent alors la cellule en masse et permettent au potentiel de membrane de retrouver sa valeur initiale. Toutefois les canaux au potassium n'étant pas immédiatement inactivés au moment où la fibre retrouve son potentiel de repos, les ions potassium continuent à quitter la cellule et provoquent ainsi une légère hyperpolarisation, le temps que la perméabilité au potassium retrouve sa valeur de repos. Dans le même temps, la pompe Na-K s'active et expulse le sodium entré pendant la phase de dépolarisation.

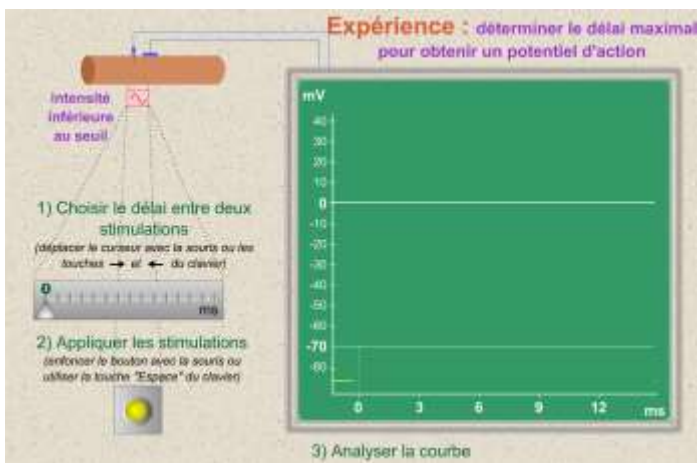
La preuve en fut apportée en utilisant deux drogues spécifiques, l'une bloquant sélectivement les canaux au sodium, l'autre ceux au potassium. En ajoutant à la préparation de la **tétródotoxine** ou **TTX** (une toxine isolée du foie et des ovaires de certains poissons de l'ordre des Tétráodontiformes vivant dans les mers chaudes asiatiques, comme le fameux fugu japonais), le potentiel d'action n'apparaît pas. La TTX présente en effet la particularité de bloquer les canaux au sodium et empêche ainsi toute dépolarisation. Inversement, en ajoutant du **tétráéthylammonium** ou **TEA** (un ammonium quaternaire) à la préparation, une fois la fibre dépolarisée, la repolarisation apparaît beaucoup plus tardivement. Cela est dû au fait que le TEA bloquant les canaux au potassium, il faut attendre que les canaux au sodium soient complètement inactivés et que la pompe Na-K ait rétabli les concentrations initiales pour que la fibre se repolarise.

3. Les expériences présentées par le fichier en flash [pa_neurone_et_nerf.swf](#)

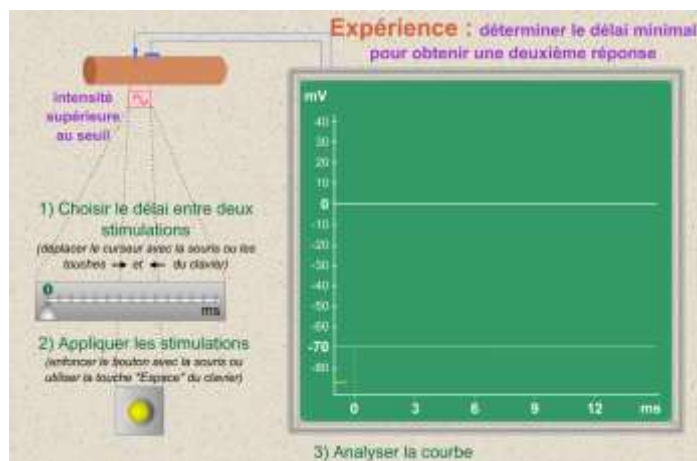
Ce petit fichier en programmation flash permet de réaliser quelques expériences de simulation autour du potentiel d'action d'un neurone ou de l'activité globale d'un nerf. Voici les expériences réalisables et les questions associées :



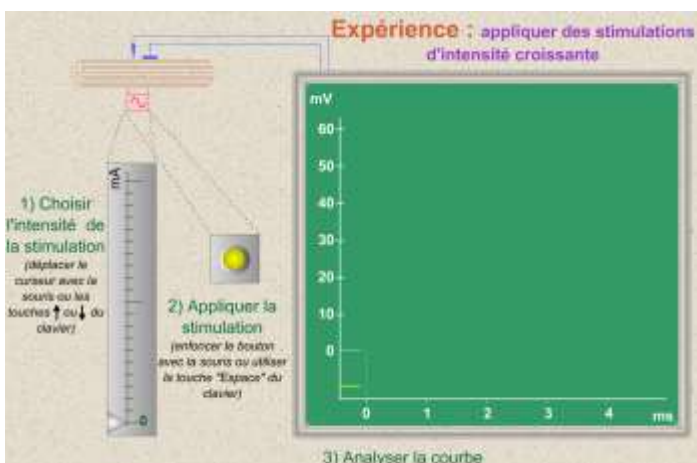
- Quel seuil d'intensité avez-vous déterminé pour le neurone de l'expérience ?
- Quelle est la durée approximative du phénomène ?
- Classer les 4 phases du potentiel d'action, en leur donnant les numéros 1 à 4 : repolarisation, potentiel d'action, hyperpolarisation, dépolarisation.



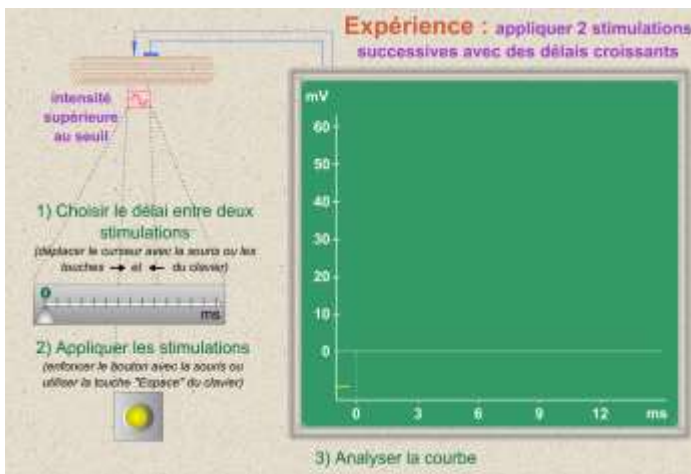
- Quel est l'intervalle maximal entre deux stimulations pour obtenir un potentiel d'action, dans le cas du neurone de l'expérience ?
- Dans cette expérience, les stimulations ont une intensité _____ au seuil. On applique au neurone ____ stimulations successives. Si le délai entre ces stimulations est _____ à la valeur trouvée dans cette expérience, on obtient un potentiel d'action après la _____ stimulation. Si ce délai est _____ à cette valeur, on n'obtient pas de réponse.



- Quelle est la durée de la période réfractaire, dans le cas du neurone de l'expérience ?
- Dans cette expérience, les stimulations ont une intensité _____ au seuil. On applique au neurone ____ stimulations successives. Si le délai entre ces stimulations est _____ à la valeur trouvée dans cette expérience, on obtient un potentiel d'action seulement après la _____ stimulation. Si ce délai est _____ à cette valeur, on obtient un potentiel d'action après chaque stimulation.



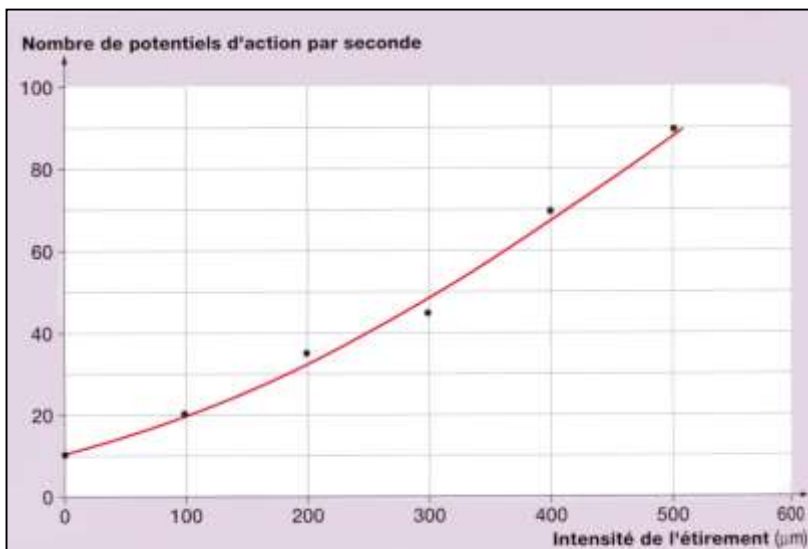
- Le nerf ne présente aucune réponse aux stimulations dont l'intensité est inférieure à environ __ milliampères. Pour des intensités de stimulation situées entre __ et __ mA, l'amplitude de la réponse est _____. Pour des intensités supérieures à __ mA, l'amplitude de la réponse du nerf est _____. Ceci s'explique par le fait que le nerf est un ensemble de _____ dont chacun possède un _____ de _____ différent.



Dans cette expérience, les _____ ont une intensité _____ au seuil. On applique au nerf _____ stimulations successives. Si le délai entre ces stimulations est _____ à _____ millisecondes, on obtient une seule réponse, après la _____ stimulation. Au-delà de ce délai, on obtient également une réponse après la _____ stimulation. Cette réponse a une amplitude _____ en fonction du délai. Cela est dû au fait qu'un nombre _____ de _____ a dépassé sa période réfractaire.

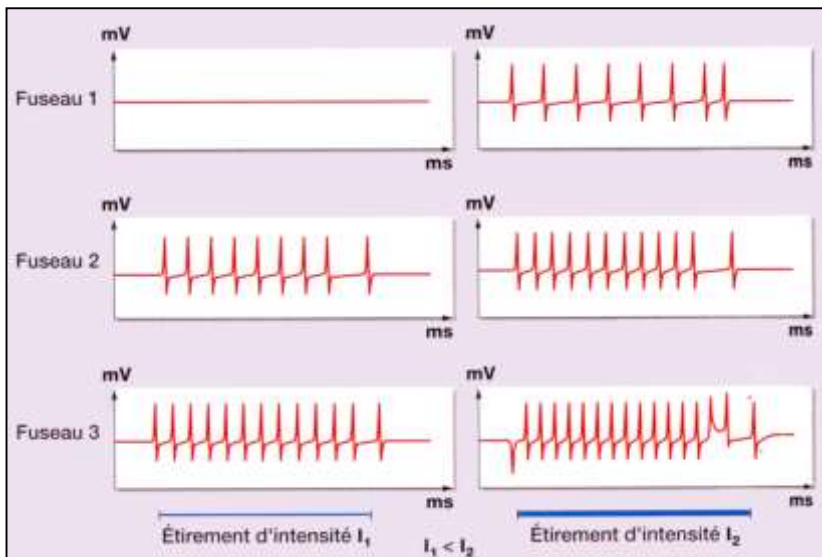
4. Étude de l'action du message nerveux afférent lors du réflexe myotatique

Document 3 : relation entre l'intensité de l'étirement et la fréquence de potentiels d'action.



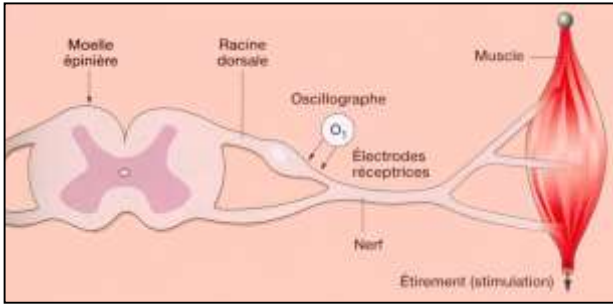
Cette mesure a été réalisée dans le cas d'un fuseau neuromusculaire de grenouille décérébrée (destruction du cortex cérébral) mais non démyélinisée (moelle épinière intacte)

Document 4 : Messages enregistrés sur les fibres nerveuses issues de 3 fuseaux neuromusculaires.

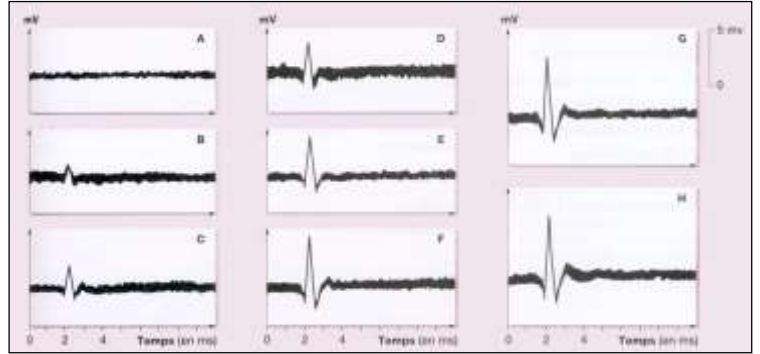


Ces trois fuseaux sont localisés de façon différente dans le muscle. On mesure les messages enregistrés sur les fibres nerveuses afférentes, pour 2 valeurs croissantes d'étirement de ce muscle.

Document 5 : Potentiel global enregistré au niveau de la racine dorsale d'un nerf musculaire.



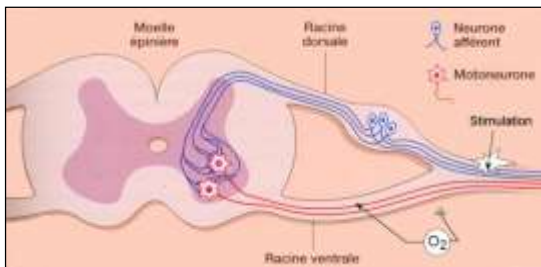
Le muscle est soumis à des étirements très brefs, d'intensité croissante de A à H. Ce message global est enregistré au moyen de 2 électrodes posées à la surface de la racine dorsale et reliées à un oscilloscope (appareil de mesure).



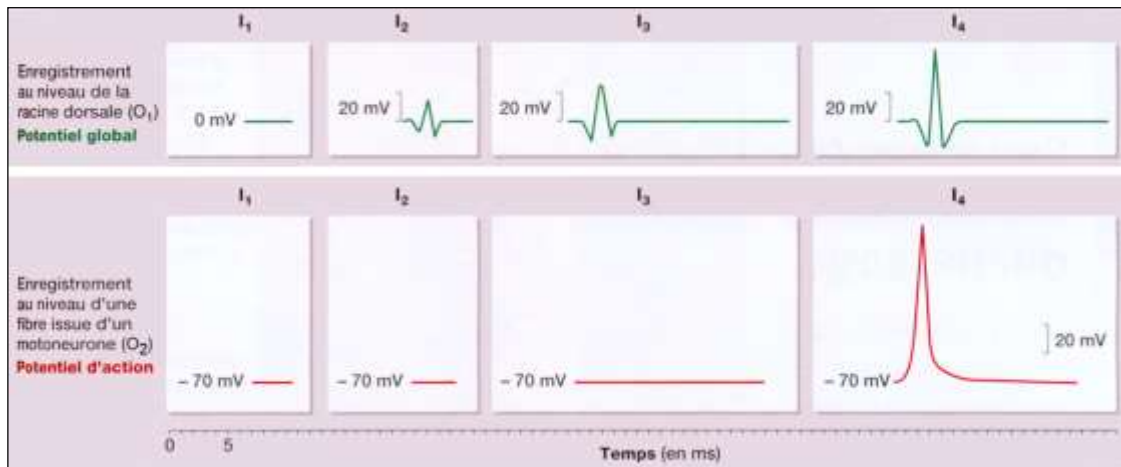
5. Origine du message nerveux efférent

Les neurones afférents mis en jeu dans le réflexe myotatique sont connectés au niveau de la moelle épinière avec les motoneurones du muscle étiré.

Document 6 : comparaison des messages nerveux afférents et efférents

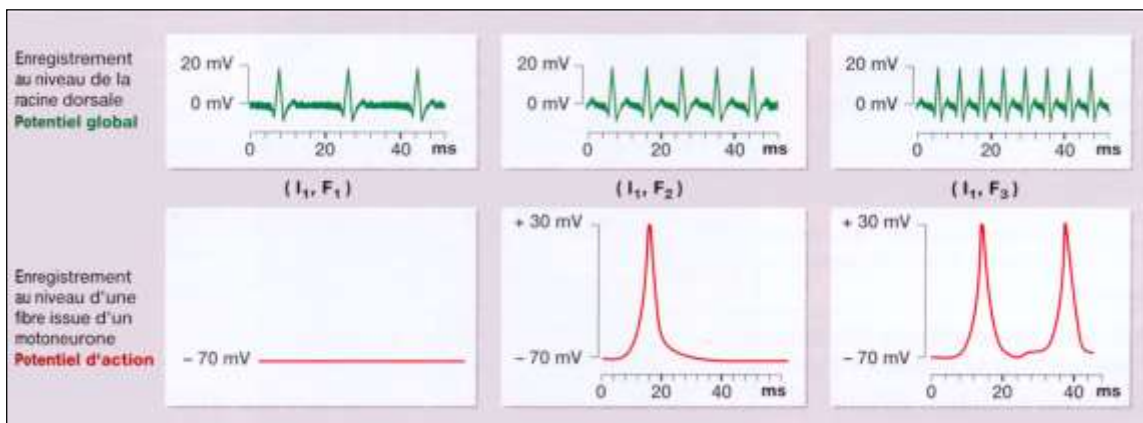


Cette comparaison est effectuée à la suite de stimulations d'intensité croissante (I1, I2, I3 et I4) sur le nerf musculaire.



Document 7 : Modélisation de la réponse d'un motoneurone en fonction de la fréquence des potentiels d'actions.

L'intensité de la stimulation est faible, c'est-à-dire infraliminaire (elle ne déclenche de message nerveux efférent à elle-seule) et demeure toujours la même mais on augmente la fréquence de la stimulation au fur et à mesure.



6. La synapse chimique

La synapse est une zone de transfert d'une information entre un neurone et une autre cellule (un autre neurone ou une cellule musculaire par exemple). On distingue différents types de synapses chimiques : la synapse neuro-neuronale (ou neuro-neuronique), la synapse neuro-musculaire (on parle de jonction neuromusculaire) et la synapse neuro-glandulaire (contact avec une glande endocrine comme les médullo-surrénales par exemple).

a. La synapse neuro-neuronique

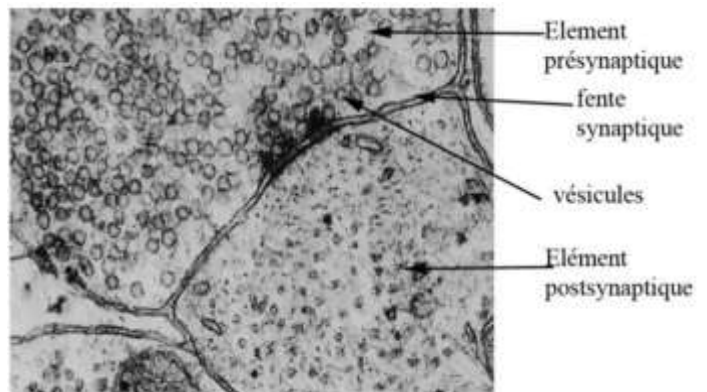
La synapse neuro-neuronique est zone de jonction entre 2 neurones. Ce type de synapse chimique se situe toujours dans la substance grise de l'encéphale et de la moelle épinière ou dans les ganglions rachidiens.

La synapse a une **structure asymétrique** avec :

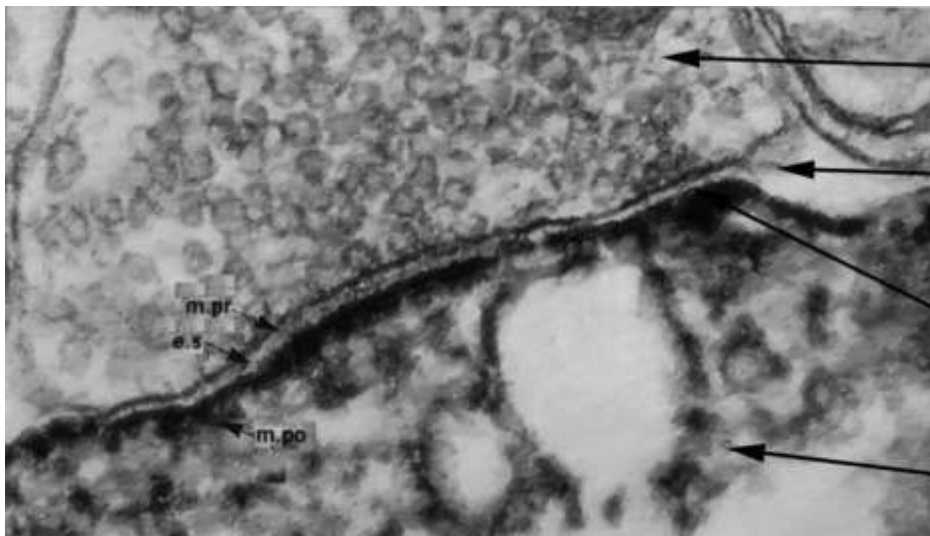
- un **élément présynaptique** reconnaissable à la présence de vésicules au niveau du bouton synaptique ;
- un **élément postsynaptique** avec une membrane plasmique épaissie.

Document 8 : synapse neuro-neuronique observée au MET x 90 000

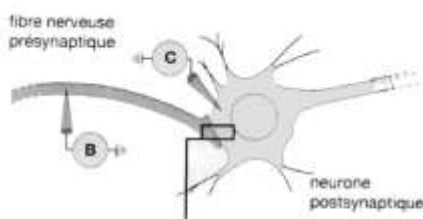
L'élément présynaptique est toujours un axone. Il peut entrer en contact avec différentes parties du neurone postsynaptique : le plus souvent, une dendrite ou le corps cellulaire. La membrane du neurone présynaptique est séparée de celle du neurone postsynaptique par une **fente synaptique** de 20 à 50 nm de large. Cet espace est suffisant pour assurer une isolation entre les 2 membranes : un potentiel d'action atteignant cette zone ne peut donc être transmis directement à la cellule voisine par des courants locaux. La transmission du message nerveux au niveau de la synapse nécessite un **messager chimique** appelé **neurotransmetteur** accumulé dans les vésicules du neurone présynaptique. Il s'agit donc d'une **transmission chimique**.



Document 9 : détail d'une synapse neuro-neuronique observée au MET x 120 000



Document 10 : mécanismes de la transmission synaptique

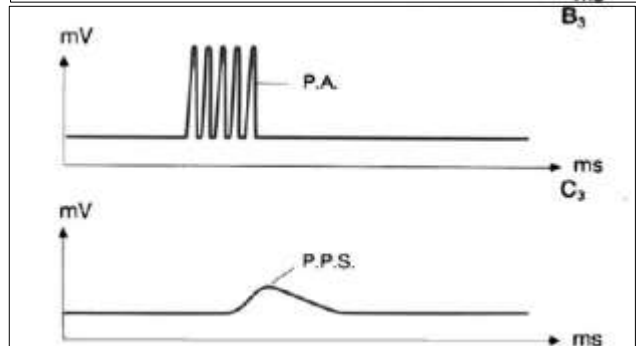
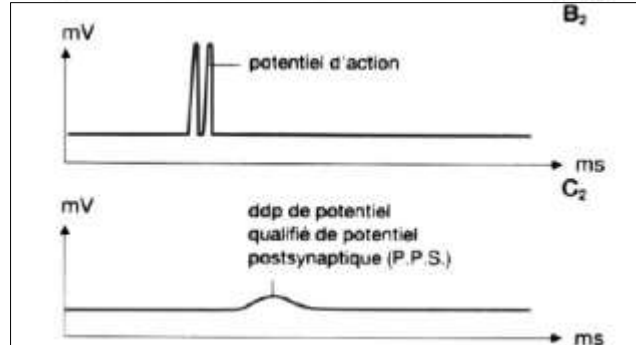
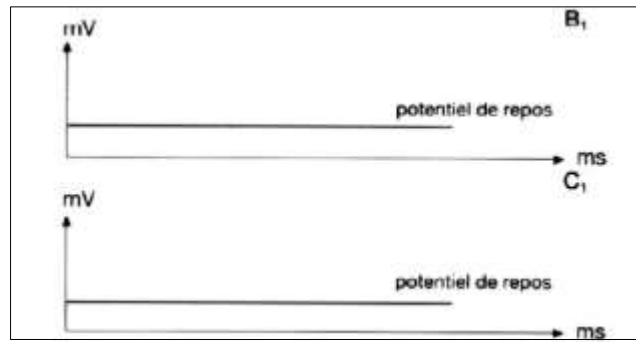
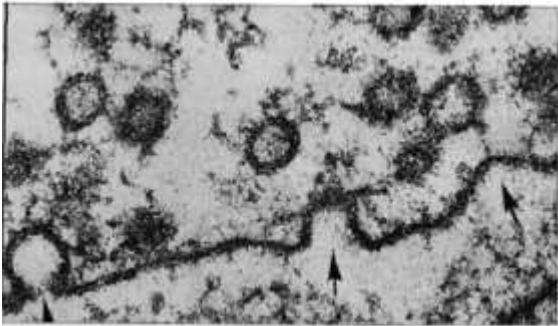
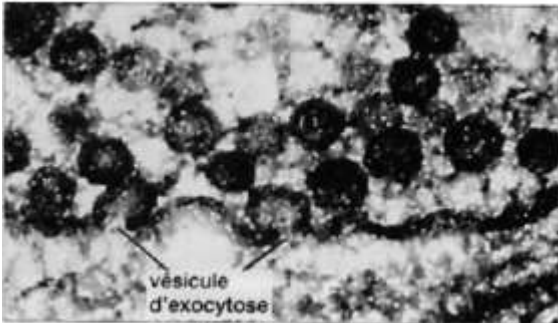
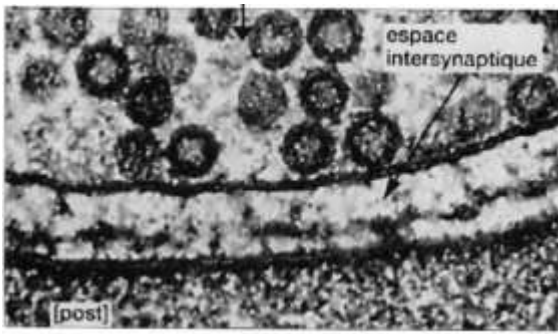


Un **oscilloscope B** est relié à une microélectrode intracellulaire placée au niveau d'une fibre présynaptique
→ Elle enregistre l'activité de la fibre présynaptique.

Un **oscilloscope C** est relié à une microélectrode intracellulaire placée au niveau de la synapse, côté postsynaptique.
→ Elle enregistre l'activité du neurone postsynaptique.

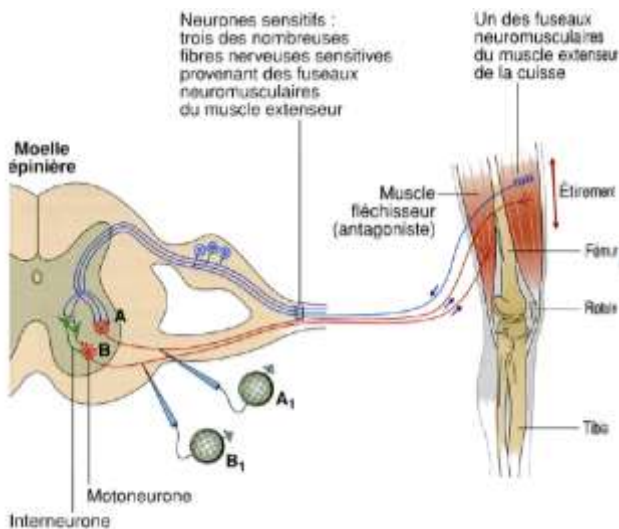
A chaque couple d'enregistrements B₁-C₁ ; B₂-C₂ et B₃-C₃ correspond l'état structural de la synapse.

Résultats page suivante

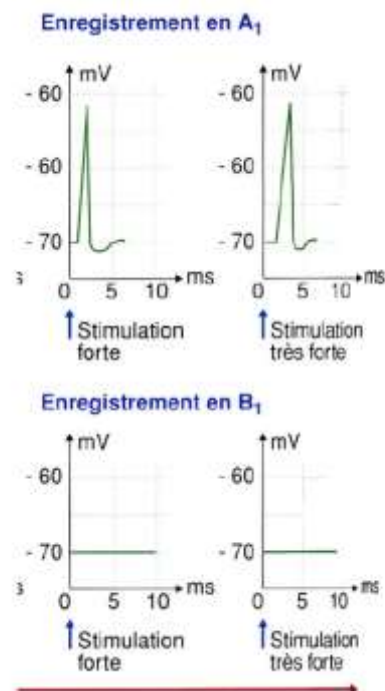


La transmission synaptique est **unidirectionnelle** et ceci est en relation avec la structure asymétrique de la synapse. La nature chimique de la transmission synaptique explique que celle-ci soit relativement lente : le **délat synaptique** ou temps de franchissement est de l'ordre de 0.5 ms. Un arc-réflexe ne présente qu'une seule synapse entre la fibre afférente et la fibre efférente, ce qui explique sa rapidité par rapport à une commande volontaire.

Document 11 : des synapses aux effets variés



On stimule les fibres afférentes selon deux intensités. Elles émettent un message nerveux (non schématisé) et on enregistre le message nerveux au niveau des motoneurones A et B.

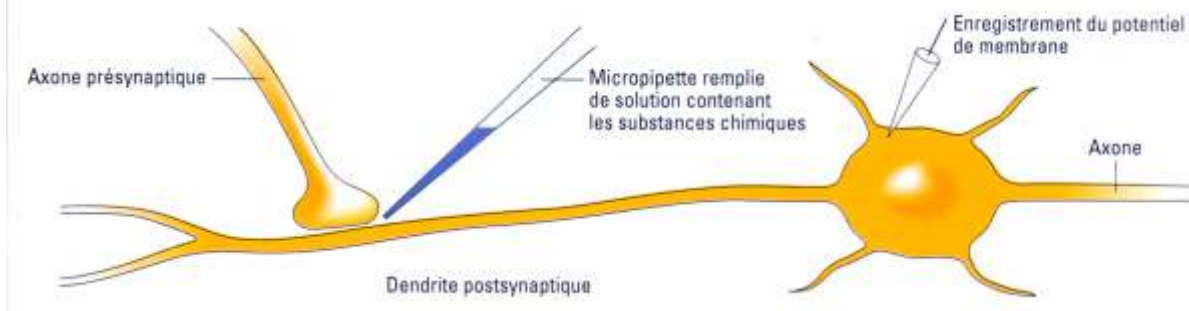


Une même stimulation des fibres afférentes peut avoir deux effets différents selon le motoneurone :

- La synapse entre la fibre afférente et le motoneurone A est **excitatrice** : elle active l'activité du motoneurone.
- La synapse entre l'interneurone et le motoneurone B est **inhibitrice** : elle inhibe (freine) l'activité du motoneurone.

Document 12 : expériences d'injection par microionophorèse

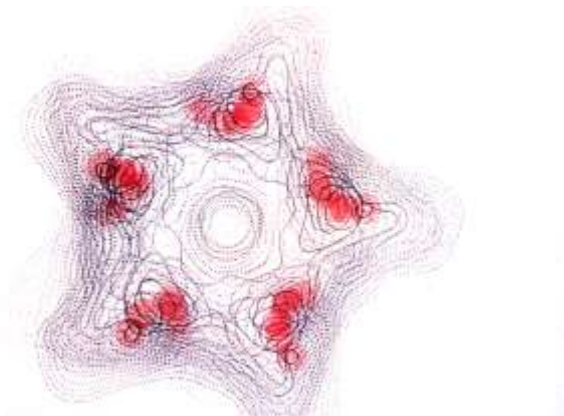
Le principe consiste à injecter des substances chimiques provenant de vésicules synaptiques dans l'espace intersynaptique.



Substances injectées	Enregistrements postsynaptiques (u.a.)	Des substances actives: les neurotransmetteurs. On appelle neurotransmetteur une substance contenue dans les vésicules synaptiques et capable de produire un message postsynaptique. Il existe des neurotransmetteurs différents selon le type de synapses: l'acétylcholine est le neurotransmetteur d'une synapse neuro-musculaire; le GABA est un neurotransmetteur produit par les interneurones du réflexe myotatique.
Eau		
Solution diluée de substance contenue dans les vésicules de la synapse du doc. 1		
Solution concentrée de substance contenue dans les vésicules de la synapse du doc. 1		
Substance provenant des vésicules de la synapse interneurone-motoneurone		

Document 13 : des récepteurs post-synaptiques

Des expériences consistant à marquer par radioactivité les molécules contenues dans les vésicules, ont permis, après une stimulation du neurone pré-synaptique de les retrouver dans un premier temps fixées sur des récepteurs implantés dans la membrane post-synaptique, et de les retrouver ensuite dégradées dans l'espace intersynaptique. Les récepteurs mis en évidence dans la membrane postsynaptique sont des molécules protéiques ayant une structure complémentaire des molécules de neurotransmetteurs. Enfin, après leur dégradation, les neurotransmetteurs sont recapturés au niveau de la membrane présynaptique.



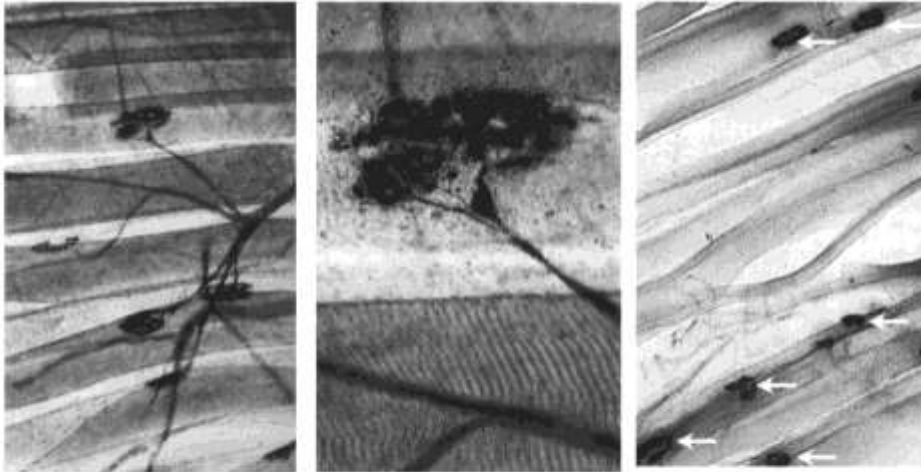
Reconstitution par ordinateur d'un récepteur membranaire. Ce récepteur membranaire, protéine située sur la membrane postsynaptique, se lie spécifiquement à l'acétylcholine. Chaque récepteur apparaît sous forme d'une roséte de 8 à 9 nanomètres de diamètre.

b. La synapse neuro-musculaire

La jonction neuromusculaire (ou plaque motrice) est la jonction entre un neurone moteur (motoneurone) et une fibre musculaire. Elle est constituée d'un très grand nombre de synapses concernant la même cellule postsynaptique qui est ici une cellule musculaire. Au niveau de chaque synapse de la plaque motrice, le neurotransmetteur libéré est de l'acétylcholine.

Les molécules d'acétylcholine synthétisées par le neurone présynaptique seront libérées dans l'espace intrasynaptique puis captées par des récepteurs spécifiques (récepteurs cholinergiques) situés sur la membrane de la fibre musculaire postsynaptique ce qui déclenchera une cascade de réactions aboutissant à la contraction de ces fibres.

Document 14 : plaque motrice



terminaisons axonales
d'un motoneurone alpha
(unité motrice)

terminaison axonale
+ plaque motrice

plaques motrices

Document 15 : synapse d'une jonction neuromusculaire



On reconnaît les vésicules de l'élément présynaptique en haut à gauche et l'élément postsynaptique constitué par la cellule musculaire en-dessous à droite, avec de nombreuses mitochondries. En bas, on retrouve les filaments de l'unité contractile de la myofibrille.

La libération d'acétylcholine provoque une libération de calcium engendrant la contraction des myofibrilles : [animation flash](#).

