Le système moteur

La production d'un mouvement volontaire

CUF - 13 Octobre 2020 - Marion Noulhiane Dr en Neurosciences

Plan

1-Niveau psychologique

2-Niveau cérébral

3-Niveau musculaire

Niveau psychologique

L'imagerie mentale d'une action

Les mouvements volontaires

- Ce qui entre dans notre cerveau provient de nos sens et ce qui en sort s'exprime sous forme de mouvement, la parole impliquant elle aussi la contraction de plusieurs muscles.
- Le corps humain comprend au moins 600 muscles qui déplacent un squelette de plus de 200 os.
- Il constitue ainsi un formidable arrangement de leviers et de ressorts dont la fine mécanique doit être coordonnée par notre système nerveux.

L’imagerie mentale d’une action

Les mouvements volontaires

- Chez l'être humain, bien que l'élaboration de mouvements volontaires ait atteint un haut degré d'originalité et de précision, il est bon de rappeler que nous conservons aussi beaucoup de réflexes qui nous facilitent la vie et qui sont apparus il y a très longtemps au cours de l’évolution.
- Cependant, même les mouvements volontaires les plus simples sous-tendent des commandes motrices d’une extrême complexité.
- Ce qui a fait dire à certains qu’il était sans doute plus facile de comprendre comment on construit les navettes qui vont dans l’espace que d’expliquer comment les astronautes font pour y grimper.

L’imagerie mentale d’une action

Apprendre de nouveaux mouvements

- Apprendre de nouveaux mouvements demande de la concentration.
- Mais en s’entraînant, l’exécution de ces mouvements peut devenir complètement automatique.
- C'est cette libération de la pensée qui permet au pianiste professionnel de laisser parler ses émotions quand il joue, par exemple.
- On y parvient en répétant le geste un grand nombre de fois ce qui, avec le temps, va rendre plus efficace les connexions du circuit nerveux sollicitées par le nouveau mouvement.

L’imagerie mentale d’une action

Apprendre de nouveaux mouvements

- Mais il semble qu’il y ait une autre façon d’améliorer l’exécution d’un geste à part la répétition pure et simple de ce geste : simplement penser au geste en question !
- C’est ce que l’on appelle **l'imagerie mentale**, qui est une technique de plus en plus utilisée par les athlètes pour améliorer leurs performances sportives.
- Si le seul fait de se répéter mentalement un mouvement le rend ensuite plus efficace, c’est qu’il semble que le cerveau ne fasse pas une grande différence entre le fait d’exécuter réellement un mouvement et celui de le visualiser intérieurement.

Si le seul fait de se répéter mentalement un mouvement le rend ensuite plus efficace, c’est qu’il semble que le cerveau ne fasse pas une grande différence entre le fait d’exécuter réellement un mouvement et celui de le visualiser intérieurement.

Visualisation et performance sportive

- Il existe une autre façon d'améliorer l'exécution d'un mouvement une fois que la gestuelle générale a été mémorisée : la simple répétition mentale du mouvement. Ce procédé, que l'on nomme « imagerie mentale », est couramment utilisé par les athlètes de haut niveau pour aller chercher les précieuses fractions de secondes au fil d'arrivée. Les skieurs de descente répètent ainsi mentalement tout le trajet de leur course avant d'amorcer leur descente. Ils perçoivent chaque virage, sentent leur corps à chaque bosse et effectuent mentalement les changements de direction appropriés.

En 1998, pratiquement tous les membres de l'équipe olympique canadienne disaient utiliser au moins une fois par jour des procédures de répétition mentale par imagerie. Chacune de ces séances durait en moyenne 12 minutes. La visualisation du mouvement, en plus d'améliorer l'efficacité de celui-ci et de permettre au corps de récupérer, affecterait aussi positivement des facteurs psychologiques comme la confiance, la concentration et la motivation.

L'imagerie mentale d'une action

Représentation mentale du mouvement

- Les travaux portant sur l'imagerie mentale ont montré l'identité des processus de production réelle et de représentation mentale du mouvement.
- Diverses voies expérimentales ont été utilisées pour montrer, par exemple, que la représentation mentale de l'action semble reposer sur les mêmes mécanismes que la préparation motrice.

L'imagerie mentale d'une action

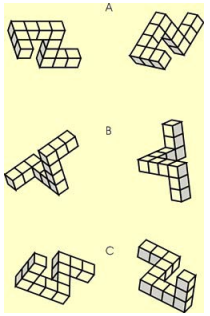
La chronométrie mentale

- Avec la chronométrie mentale, on a pu montrer que les images mentales visuelles préservent les caractéristiques spatiales et structurales de l'objet ou de la scène qu'elles représentent.
- Il a par exemple été établi que le temps de déplacement visuel entre deux points d'une image mentale était proportionnel à la distance séparant ces deux points sur l'objet réel.

L'imagerie mentale d'une action

La chronométrie mentale

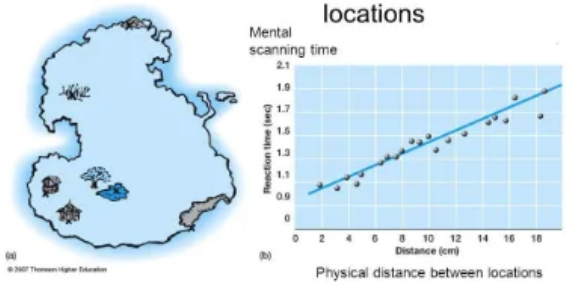
- Les expériences de Parsons sur la rotation mentale d'objet aboutit aux mêmes conclusions : le temps de rotation mentale d'un objet est proportionnel à l'angle de la rotation effectué.
- Par exemple, les sujets doivent décider si une main présentée en photographie correspond à la main droite ou à la main gauche.
- Et encore une fois, ils mettent autant de temps à prendre la décision qu'à faire une rotation réelle de leur main pour atteindre la position présentée.
- La constante des résultats de chronométrie mentale est donc la similarité frappante des durées d'actions réelles et représentées mentalement.



Pour déterminer si les deux objets sont les mêmes, le sujet doit en faire une rotation mentale afin de les comparer.

Mental scanning (Kosslyn et al. 1978)

- Ss scanning times were linearly related to the physical distances between locations



L'imagerie mentale d'une action

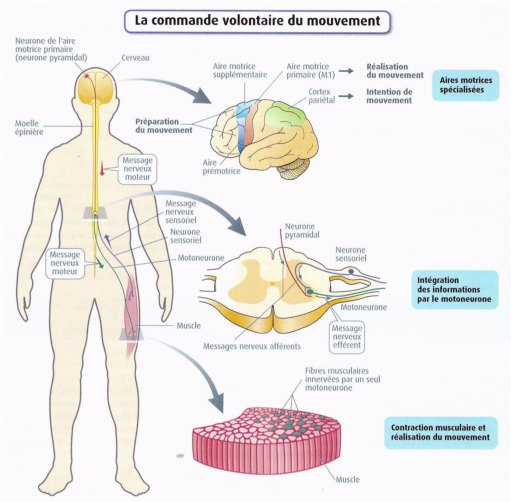
Imagerie mentale et modalités sensorielles

- Le concept d'imagerie motrice s'étend aussi aux modalités sensorielles : vivre une expérience sensorielle quelconque et se la représenter par la suite mentalement produit une activité cérébrale similaire en terme de localisation et d'intensité.
- L'activité du cerveau influençant constamment le corps et vice versa, toute expérience vécu a un effet donné sur le corps, et le fait de la visualiser à nouveau engendrerait un activité semblable qui aurait des effets comparables sur le système endocrinien, immunitaire, etc.

- Confortablement installé, vous fermez les yeux et vous vous représentez (vous évoquez) la pièce où vous êtes.
- Vous promenez votre regard interne sur chacun des objets pendant quelques secondes afin de distinguer d'abord la forme, puis la couleur, sans vous parler (pas d'évocation verbale).
- Vous ouvrez ensuite les yeux et vous regardez attentivement la pièce, pour vérifier si l'**image mentale** est fidèle à la réalité. Puis vous encodez (vous enregistrez dans votre tête) les objets, pour en retenir les formes, les couleurs et la position spatiale de chacun d'eux.
- Vous fermez ensuite les yeux et vous recommencez le 1 et le 2 jusqu'à ce que l'**image mentale** soit fidèle au percept.
-

De façon très générale, on peut donc considérer la visualisation comme une forme d'auto-suggestion ou d'auto-hypnose qui, en générant des émotions, peut avoir un effet physiologique bénéfique sur le corps.

Les mécanismes précis de cette interaction sont encore mal connus, mais de nombreuses études ont pu en démontrer les effets physiologiques réels.

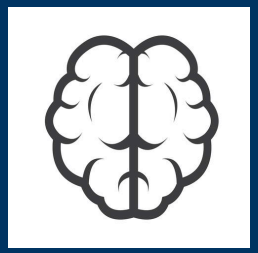


Niveau cérébral

Niveau Cellulaire

Niveau Moléculaire

Niveau cérébral



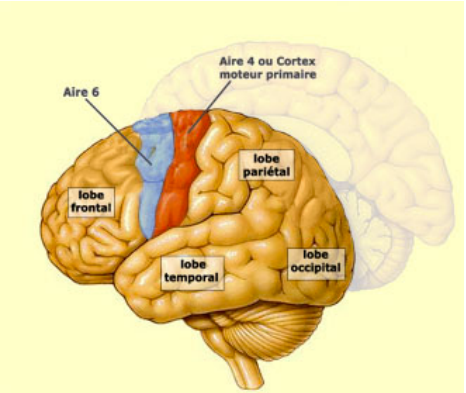
1-Le cortex moteur

1- Le cortex moteur

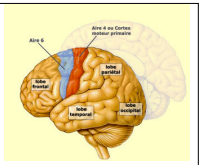
- La commande de tous nos mouvements volontaires provient de notre cerveau.
- Une des régions les plus impliquées dans le contrôle de ces mouvements volontaires est le **cortex moteur**.

Le cortex moteur

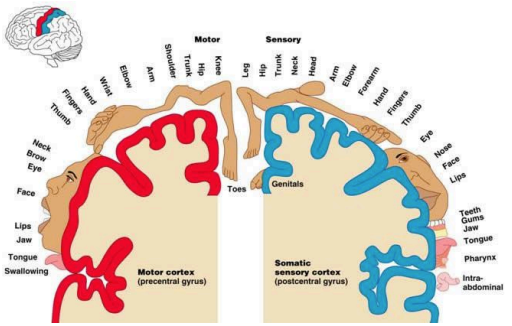
- Le cortex moteur est situé à l'arrière du lobe frontal, juste avant le sillon central qui sépare le lobe frontal du lobe pariétal.
- On subdivise le cortex moteur en deux grandes aires, l'aire 4 et l'aire 6.
- L'aire 4, que l'on désigne aussi comme le cortex moteur primaire, forme une mince bande qui longe le sillon central alors que l'aire 6 s'étend immédiatement en avant de l'aire 4.
- L'aire 6 est plus large et se subdivise encore en deux sous-régions distinctes.

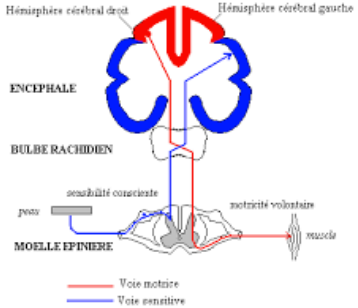


1- Le cortex moteur



- Pour réaliser des mouvements dirigés vers un objectif, notre cortex moteur va recevoir de l'information des différents lobes du cerveau.
- Ainsi, il sera renseigné sur
  - la situation du corps dans l'espace par le lobe pariétal,
  - sur les objectifs à atteindre et le choix d'une stratégie appropriée par la partie antérieure du lobe frontal,
  - sur les souvenirs d'anciennes stratégies par le lobe temporal, etc.



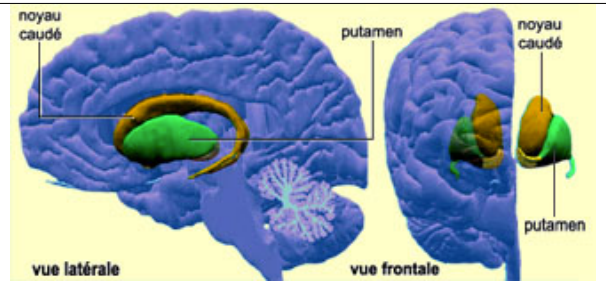


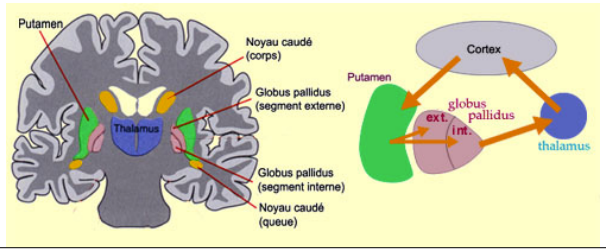
Trajets de l'influx nerveux lors d'un mouvement volontaire et lors de la sensibilité consciente

2-Les ganglions de la base

2-Les ganglions de la base

- Les ganglions de la base sont, comme leur nom l'indique, formés d'un ensemble de structures nerveuses enfouies profondément sous le cortex.
- Les principales sont
  - le noyau caudé,
  - le putamen
  - le globus pallidus.





2-Les ganglions de la base

- Les ganglions de la base sont étroitement interconnectés et reçoivent également des informations en provenance de plusieurs régions du cortex cérébral.
- Une fois traitée par les ganglions de la base, cette information retourne au cortex moteur en passant par le thalamus.

2-Les ganglions de la base

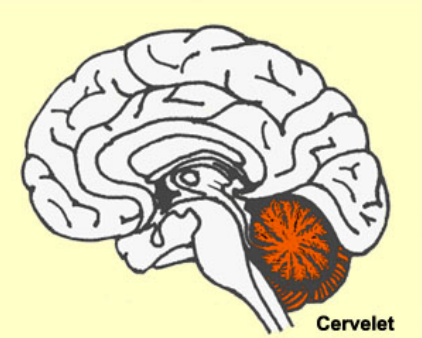
- L’une des fonctions de cette boucle, qui s’ajoute à celle impliquant le cervelet, est vraisemblablement de **sélectionner et de déclencher des mouvements volontaires harmonieux.**

  Ce rôle dans l'initiation et le bon déroulement de la commande motrice apparaît clairement chez les personnes dont les ganglions de la base sont endommagés, comme c’est le cas lors de **la maladie de Parkinson** par exemple.

- On observe alors chez ces patients de la difficulté à commencer les mouvements qu'ils ont planifiés, des tremblements ainsi qu’une lenteur dans l’exécution de leurs gestes.
-

3-Le cervelet

Le cervelet



Le cervelet

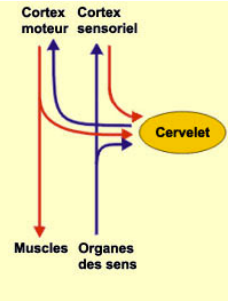
- Pour effectuer un geste simple comme se toucher le nez avec le doigt, commander aux muscles de se contracter ne suffit pas.
- Car pour que les différents segments du bras se déploient avec harmonie, il faut qu’**une ‘’horloge” interne** puisse régler avec précision **l’enchaînement et la durée des mouvements élémentaires de chaque segment.**
- **Cette horloge, c’est le cervelet.**

Le cervelet

- Comme souvent en neurobiologie, pour avoir une idée de ce que fait concrètement le cervelet, on peut observer des patients qui ont eu une partie des lésions de leur cervelet (à la suite d'une tumeur ou d'un AVC, par exemple).
- Lorsque ces patients cherchent à atteindre un objet, le mouvement de leur main démarre avec retard, s'avance de manière erratique, arrête avant la cible ou s'accélère souvent au-delà de celle-ci.
- Au niveau de la posture, des troubles de l'équilibre qui rappellent celui d'un homme ivre sont aussi très caractéristiques d'une personne au cervelet endommagé.
- De fait, la maladresse qui accompagne l'excès d'alcool sont directement en rapport avec ses effets dépresseurs sur l'activité du cervelet.

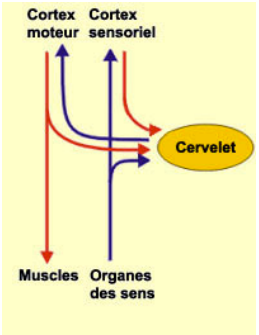
Le cervelet

- Chez la personne saine, le cervelet reçoit du cortex sensoriel et moteur de l'information sur l'intention d'un mouvement.
- Il informe ensuite en retour le cortex moteur des caractéristiques requises pour le mouvement à effectuer en terme de direction, de force et de durée.
- Cette boucle impliquant le cervelet s'ajoute donc à l'autre boucle impliquant les ganglions de la base pour régler dans le détail la commande motrice.

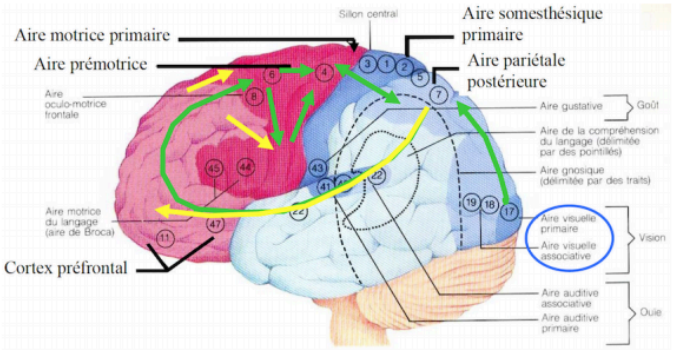


Le cervelet

- Une autre métaphore résume assez bien le rôle du cervelet : celui d'un contrôleur aérien qui collecte une quantité incroyable d'informations incluant la position du membre et de la cible à chaque instant, la vitesse du mouvement et l'influence d'obstacles potentiels pour permettre un « atterrissage » en douceur de votre doigt sur votre nez, par exemple.

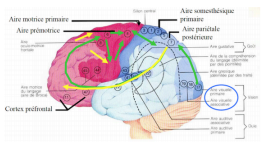


5-LA SÉQUENCE D'ACTIVATION DES AIRES MOTRICES



Aires motrices

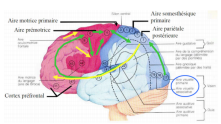
Séquences d'activation



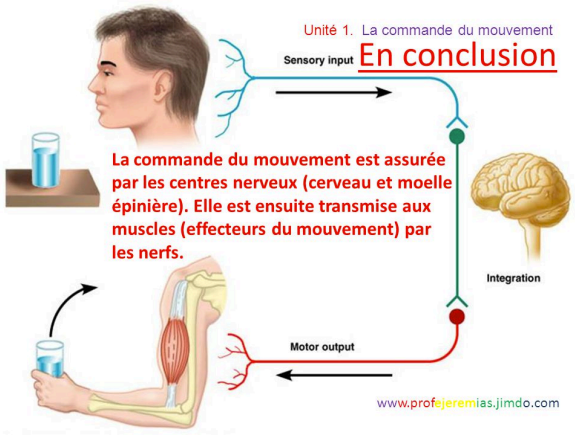
- Le cerveau sert essentiellement à produire des comportements qui sont d'abord et avant tout des mouvements.
- => **Plusieurs régions du cortex cérébral sont impliquées dans le contrôle de nos mouvements.**
- Ces régions montrent une organisation hiérarchique semblable à celle de l'équipage d'un bateau. Sur une galère par exemple, c'est **le capitaine** qui détermine et planifie la destination d'un voyage en évaluant les différents facteurs qui motivent la traversée. **Ses lieutenants** calculent ensuite la direction que doit prendre le bateau pour y arriver en fonction des conditions climatiques. Ils transmettent finalement leurs consignes **aux rameurs** qui impriment son mouvement et sa direction au bateau.

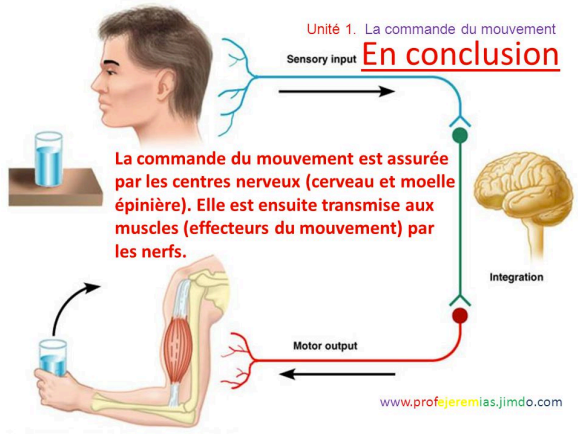
Aires motrices

Séquences d'activation



- Dans notre cerveau, la **planification du mouvement** se fait surtout dans la partie avant du lobe frontal. Celle-ci est informée par plusieurs autres régions du cortex de la situation dans laquelle se trouve l'individu.
- **Le capitaine** transmets ensuite ses ordres à l'aire 6 où le choix d'un ensemble de muscle à contracter pour réaliser le mouvement se fait.
- **Les lieutenants** de l'aire 6 transmettent ensuite leurs ordres aux **rameurs** du cortex moteur primaire (aire 4) qui vont activer **des muscles ou des groupes de muscles** précis par l'entremise des motoneurones de la moelle épinière.





Aires motrices

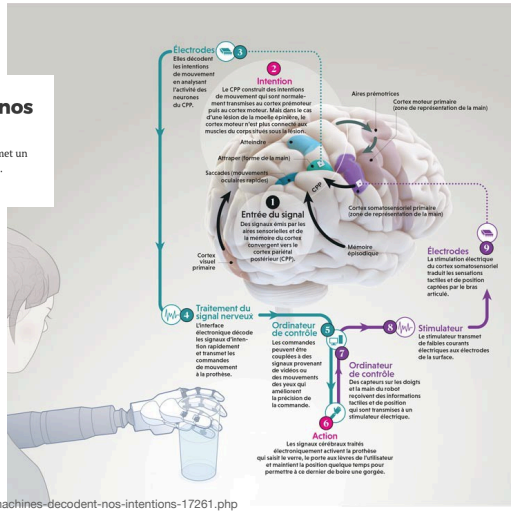
Séquences d'activation

- Pour un geste aussi simple que prendre un verre d'eau avec la main, il est pratiquement impensable d'essayer de spécifier la séquence, la force, l'amplitude et la vitesse de contraction de chacun des muscles impliqués. Pourtant, si l'on est en santé, on fait tous ce geste le plus simplement du monde sans avoir à réfléchir.
- La décision de prendre un verre d'eau s'accompagne d'une augmentation de l'activité électrique dans la région frontale du cortex. Grâce à leurs axones, ces neurones du cortex frontal vont par la suite activer le cortex moteur proprement dit qui, avec l'aide de l'information fournie par le cortex visuel, va déterminer la trajectoire idéale pour atteindre le verre. Pour ce faire, il mettra à contribution d'autres régions du cerveau comme les noyaux gris centraux et le cervelet qui aident à initier et à coordonner la séquence de muscles à activer.

Aires motrices

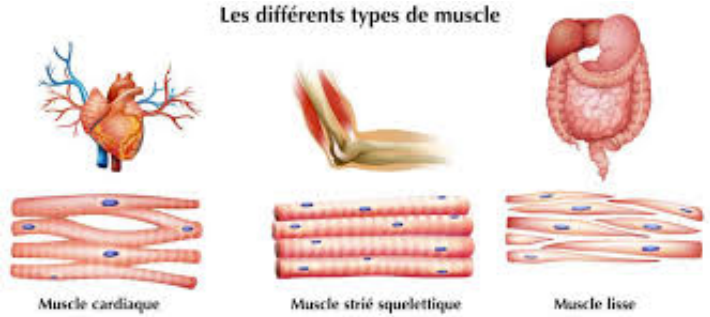
Séquences d'activation

- Les axones des neurones du cortex moteur primaire descendent jusque dans la moelle épinière. C'est là que se fait le dernier relais avec les neurones moteurs de la moelle. Ceux-ci sont connectés directement aux muscles et provoquent leur contraction. Et c'est en tirant sur les os que les muscles déclenchent enfin le mouvement qui va permettre de saisir le verre.
- De plus, pour que les mouvements soient coordonnés, précis et rapides, le système nerveux doit continuellement recevoir des informations sensorielles du monde extérieur pour adapter et corriger sa trajectoire. Il y parvient surtout grâce au cervelet qui reçoit des propriocepteurs la position des articulations et du corps dans l'espace.



https://www.pourlascience.fr/sd/neurosciences/quand-les-machines-decodent-nos-intentions-17261.php

Niveau musculaire



Le muscle strié squelettique

Organe effecteur de la motricité somatique

- Le muscle strié squelettique est l'**organe effecteur de la motricité somatique**, qui regroupe l'ensemble des fonctions permettant à un organisme de se déplacer dans ou d'interagir avec son milieu en mobilisant les pièces de son squelette.
- Il s'insère sur les **pièces du squelette** par l'intermédiaire de tendons et la force contractile exercée fait pivoter les segments du squelette autour de leurs articulations.
- Il peut aussi s'insérer entre **un os et un organe mou** : les yeux sont mobilisés par des muscles striés squelettiques (muscle oculomoteurs) lors de la lecture ou de la poursuite d'une cible par le regard.

Le muscle strié squelettique

Organe effecteur de la motricité somatique

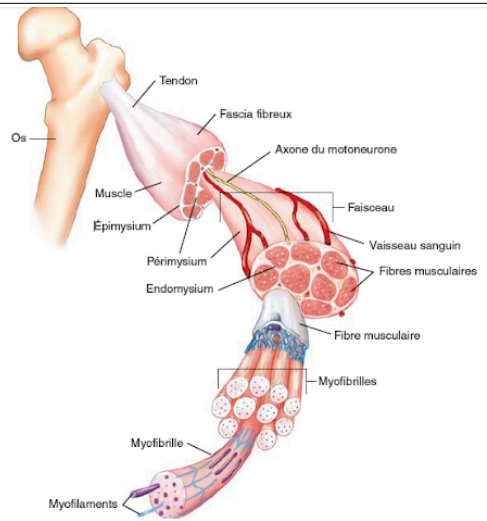
- Loin de constituer une population homogène, ils diffèrent entre eux par :
  - leur fonction anatomique (fléchisseur, extenseur),
  - leurs propriétés métaboliques (synthèse d'ATP/énergie cellulaire)
  - ou fonctionnelles (vitesse de contraction, résistance à la fatigue).
- Cette disparité anatomo-fonctionnelle témoigne de la grande diversité des actions motrices (activité posturale, mouvement volontaire).

Le muscle strié squelettique

Organe effecteur de la motricité somatique

Le muscle strié squelettique est donc l'organe du maintien d'une posture (motricité statique) ou du mouvement volontaire (motricité cinétique).

Le muscle striée squelettique



LE MUSCLE EST COMPOSÉ DE CELLULES DIFFÉRENCIÉES : LES FIBRES MUSCULAIRES

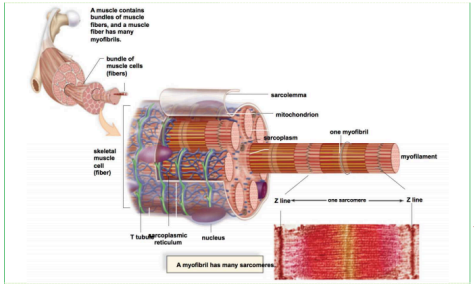
Les fibres musculaires

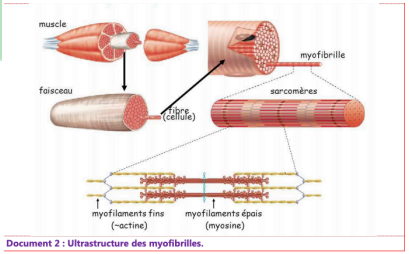
- Un muscle squelettique est constitué de quelques dizaines à quelques milliers de fibres musculaires, de 10 à 100 µm de diamètre et de plusieurs centimètres de long, regroupés en faisceaux.
- Les fibres musculaires se terminent à leurs extrémités par des filaments de collagène, qui, regroupés, forment les tendons et assurent la fixation du muscle sur ses points d'insertion.

LE MUSCLE EST COMPOSÉ DE CELLULES DIFFÉRENCIÉES

Les fibres musculaires

- Une fibre musculaire est, en fait, un ensemble de cellules dont le cytoplasme a fusionné (syncytium); les nombreux noyaux de ces cellules sont situés à la périphérie du cytoplasme (sarcoplasme), juste sous la membrane cellulaire (sarcolème).
- La fibre musculaire, qui transforme l'énergie chimique de l'ATP (adénosine triphosphate : produit du métabolisme cellulaire des nutriments) en énergie mécanique (et en chaleur), renferme, dans son sarcoplasme, des protéines "contractiles" (actine et myosine) et des protéines régulant la contraction musculaire (tropomyosine, troponine), ensemble de protéines formant les myofibrilles.



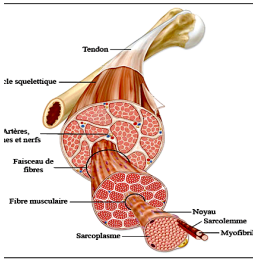


Document 2 : Ultrastructure des myofibrilles.

LE SARCOLÈME RECOIT ET TRANSMET LE MESSAGE NERVEUX

- Le sarcolème est constitué d'une double couche de phospholipides, qui contient toutes sortes de protéines : protéines de structure, enzymes, canaux ioniques, récepteurs, transporteurs d'ions ou de molécules.
- Les propriétés fonctionnelles du sarcolème dépendent de la nature de ces protéines, qui ne sont pas également réparties à la surface de la cellule.
- On distingue, en fait, deux régions :
  - une région réceptrice de la commande nerveuse et
  - une région conductrice.

Sarcolemne

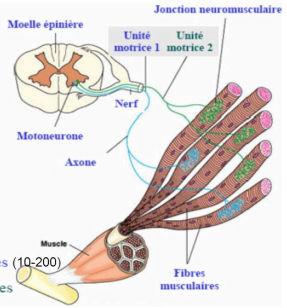


Unité Motrice

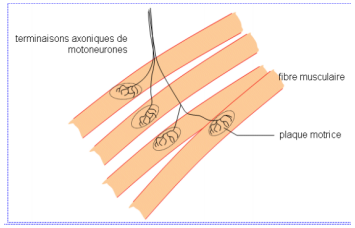
COMPORTE :
1 motoneurone (MN)
et
l'ensemble des f.m. qu'il innerve

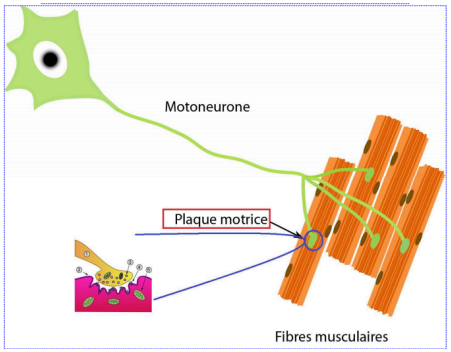
⇔

UNITE FONCTIONNELLE DU CONTRÔLE NEURO-MUSCULAIRE



UM de type 1: que des fm lentes (10-200)
UM de type 2: que des fm rapides
300-800 FM: plus de force



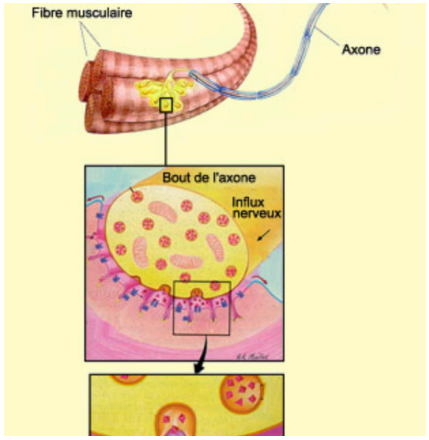


LA MEMBRANE RÉCEPTRICE DU MESSAGE NERVEUX - LA "PLAQUE MOTRICE" ET LE POTENTIEL DE PLAQUE MOTRICE

La jonction neuro musculaire et la contraction des muscles

- Quand le cerveau décide d'un mouvement et donne l'ordre aux motoneurones de l'exécuter, en bout de ligne, les muscles vont se contracter pour faire bouger la partie du corps concernée.
- Pour ce faire, les axones des motoneurones doivent sortir de la moelle épinière en formant un nerf pour aller rejoindre les muscles.
- Arrivé près d'un muscle, l'axone va faire ce que l'on appelle **une jonction neuromusculaire** avec lui.

Jonction neuro musculaire et contraction des muscles



Les muscles volontaires ont besoin d'être stimulés par le système nerveux somatique pour se contracter.

En cela, ils diffèrent des muscles cardiaques et des muscles lisses qui peuvent se contracter d'une façon autonome.

Les nerfs du système nerveux autonome qui innervent ces muscles sont plutôt là pour moduler la fréquence et la force de leur contraction.

DONC :

Un muscle squelettique est formé de fibres musculaires d'un centième à un dixième de millimètre de diamètre et de plusieurs centimètres de long.

Les fibres musculaires se terminent à leurs extrémités par des filaments de collagène qui forment les tendons et assurent la fixation du muscle sur les os.

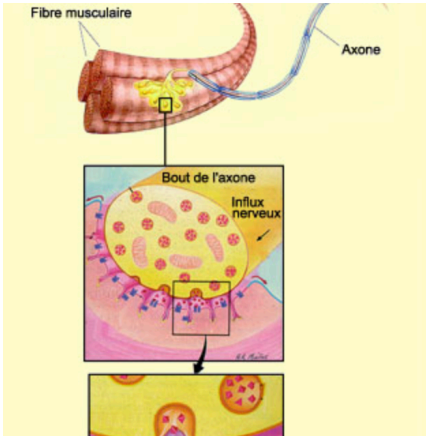
1- Membrane réceptrice pour la contraction du muscle : la jonction neuromusculaire

LA MEMBRANE RÉCEPTRICE DU MESSAGE NERVEUX - LA "PLAQUE MOTRICE" ET LE POTENTIEL DE PLAQUE MOTRICE

La jonction neuro musculaire et la contraction des muscle

- La jonction neuromusculaire est simplement le nom donné à la synapse entre l'axone des motoneurones et la fibre musculaire. Quand l'influx nerveux arrive au bout de l'axone, il fait sortir des milliers de petites vésicules remplies d'un neurotransmetteur appelé acétylcholine.
- L'acétylcholine ainsi libérée va se fixer sur à la surface de la fibre musculaire, à des endroits spécialisés où l'on retrouve une grande quantité de récepteurs à l'acétylcholine.
- Comme dans un neurone, la fixation du neurotransmetteur à son récepteur va déclencher à la surface de fibre musculaire un nouvel influx nerveux. Celui-ci, en se propageant rapidement dans toute la fibre grâce à son organisation particulière, va la faire se contracter.

Jonction neuro musculaire et contraction des muscles



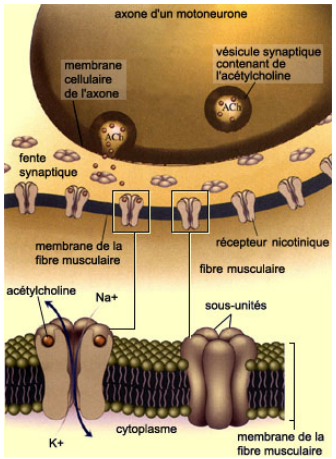
2 - Membrane conductrice : le récepteur nicotinique de l'Acétylcholine

La jonction neuromusculaire

- L'acétylcholine est une petite molécule qui agit comme messager chimique à la jonction neuromusculaire pour propager l'influx nerveux du nerf au muscle.
- Empaquetées dans des vésicules à l'extrémité de l'axone, les molécules d'acétylcholine sont relâchées dans la fente synaptique avec l'arrivée de l'influx nerveux en provenance du motoneurone. Certaines vont alors se fixer sur les récepteurs nicotiniques, de grosses protéines fichées dans la membrane de la fibre musculaire.
- Ce récepteur nicotinique doit son nom au fait qu'en plus de l'acétylcholine, la nicotine peut également s'y fixer.

Le récepteur nicotinique de l'Acétylcholine

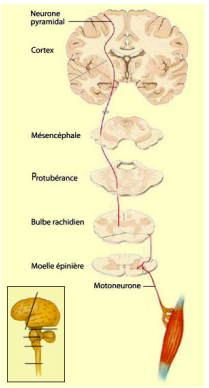
- Ces premières études qui datent du début des années 1970 ont mis à jour la structure particulière de ce récepteur.
- En effet, celui-ci est en même temps le site de fixation de l'acétylcholine et le canal qui sera ouvert par cette fixation pour permettre l'entrée de sodium dans la fibre musculaire.
- Et c'est ce sodium qui va régénérer l'influx nerveux dans la fibre musculaire et la faire se contracter.

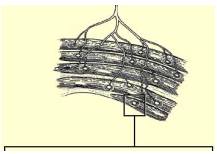


La jonction neuro musculaire et la contraction des muscles

Motoneurone et fibre musculaire

- Les axones des motoneurones, lorsqu'ils arrivent à proximité d'un muscle pour l'innerver, se divisent en plusieurs branches qui vont chacune établir une jonction neuromusculaire avec une fibre musculaire.

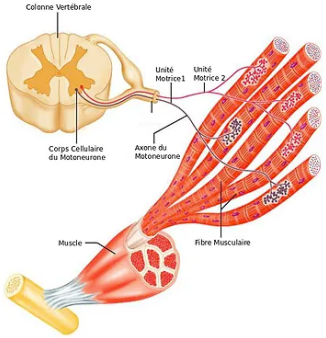




La jonction neuro musculaire et la contraction des muscles

L'unité motrice

- Le potentiel d'action en provenance d'un motoneurone va donc provoquer la contraction musculaire d'un ensemble de fibres musculaires formant ce que l'on appelle une "unité motrice ».
- L'unité motrice est donc le plus petit élément contractile que le système nerveux peut mettre en jeu.
- Le corollaire étant qu'une fibre musculaire n'est toujours innervée que par un seul motoneurone.

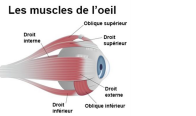


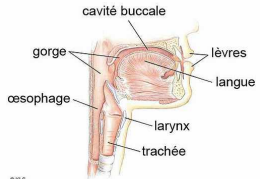
Plus un organe nécessite un contrôle moteur fin, plus la taille de l'unité motrice est petite.

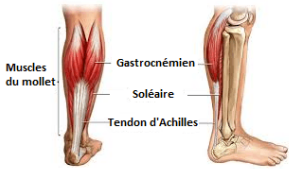
Par exemple, un motoneurone peut déclencher la contraction de moins de 10 fibres musculaires dans les muscles oculaires.

Dans le larynx, c'est à peine 2-3 fibres qui sont contrôlées par un motoneurone.

À l'opposé, les unités motrices du muscle du mollet (gastrocnemius) comprennent de 1000 à 2000 fibres musculaires réparties dans tout le muscle.







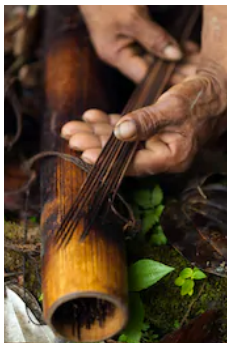
Substances toxiques et Acétylcholine

Des toxines agissent directement sur le récepteur nicotinique en occupant le site de fixation de l'acétylcholine.

L'acétylcholine étant libérée dans la fente synaptique mais ne pouvant se fixer aux récepteurs, la contraction musculaire n'a pas lieu.

C'est de cette façon qu'agit le curare dont les indiens d'Amazonie enduisent leur flèche : le poison tue en paralysant les muscles du diaphragme.

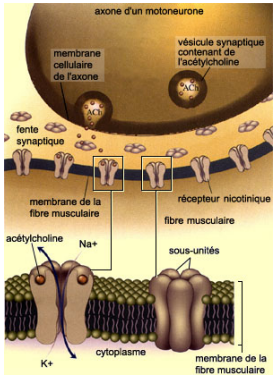
C'est le même mécanisme qui est à l'œuvre avec la bungarotoxine, un venin de serpent.



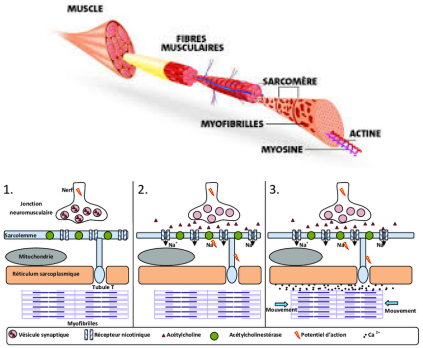
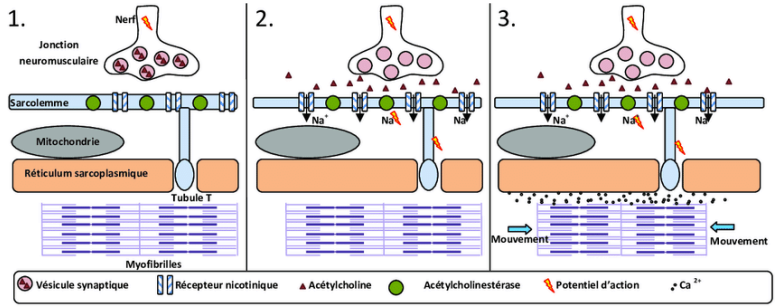
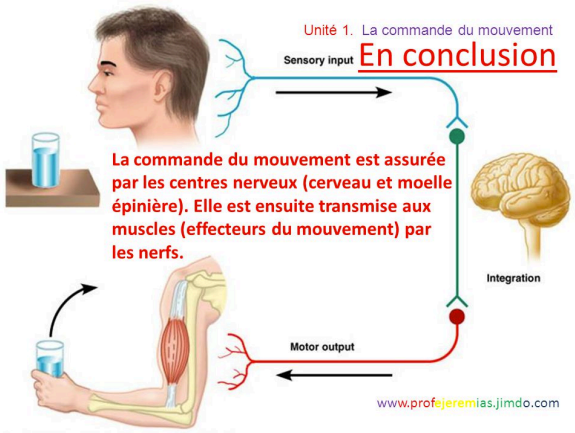
La jonction neuro musculaire et la contraction des muscles

Les récepteurs nicotiniques

- Quand un potentiel d'action arrive à une jonction neuromusculaire, il provoque le relâchement d'acétylcholine.
- Celle-ci se fixe sur les récepteurs nicotiniques situé sur la "plaque motrice", région spécialisée de la membrane post-synaptique de la fibre musculaire où se trouve concentrés les récepteurs.
- Cette fixation provoque l'ouverture de des récepteurs-canaux nicotiniques et l'entrée d'ions sodium dans le muscle.



La jonction neuro musculaire et la contraction des muscles

Potentiel d'action et contraction du muscle

- Cette entrée de sodium, si elle est suffisante pour faire passer le potentiel de repos de la fibre musculaire de -95 milivolts à environ -50 milivolts, provoque un potentiel d'action musculaire qui se répand dans toute la fibre.
- Celui-ci voyage d'abord à la surface du sarcolemme, cette membrane excitable qui entourent les différentes structures cylindriques contractiles dénommées myofibrilles.
- Or, pour atteindre les myofibrilles, dont certaines sont situées en profondeur dans la fibre musculaire, le potentiel d'action musculaire suit le réseau de tubule T (pour transverse) qui partent du sarcolemme et s'enfoncent au cœur de la fibre.
-