



LE FONCTIONNEMENT DU MUSCLE SQUELETTIQUE

Introduction :

Les muscles squelettiques sont les effecteurs des réactions motrices volontaires et réflexes comme le réflexe myotatique. Ces muscles sont attachés aux os du squelette par les tendons.

La contraction de ces muscles squelettiques est commandée par les centres nerveux (cerveau et moelle épinière) qui leur transmettent des messages nerveux par l'intermédiaire de fibres nerveuses motrices.

Chez l'Homme (et l'animal), les mouvements impliquent des contractions musculaires.

Cette activité musculaire est commandée par un message nerveux moteur. Elle s'accompagne d'une dépense énergétique importante et un dégagement de chaleur.

- Quelle est la structure du muscle squelettique ?
- Comment se fait la jonction entre les fibres nerveuses motrices et le muscle ?
- Comment se fait la transmission neuromusculaire ?
- Quel est le mécanisme de la contraction musculaire ?

Pour comprendre le fonctionnement du muscle squelettique il faudrait connaître sa structure détaillée ainsi que sa relation anatomique avec le système nerveux.

I- Structure du muscle squelettique :

1- Morphologie du muscle squelettique : doc 1 p211

Un muscle squelettique présente une partie centrale charnue rouge appelée **ventre du muscle** avec deux extrémités blanchâtres appelées **tendons**.

Le ventre du muscle est constitué **fibres musculaires** regroupées en **faisceaux**.

Le muscle est entouré d'une **membrane conjonctive** qui se ramifie à l'intérieur formant des **cloisons conjonctives**. Dans ces cloisons on observe des sections de vaisseaux sanguins et de nerfs.

Ces cloisons séparent les faisceaux et s'unissent aux extrémités du muscle pour constituer les tendons.

2- Structure de la fibre musculaire : doc 2 et 3 p211

La fibre musculaire est l'unité de structure du muscle. C'est une cellule de grande taille (1 à 5 cm de long et 10 à 10 µm de diamètre). Elle est limitée par une membrane plasmique ou **sarcoleme**. Son cytoplasme contient plusieurs éléments allongés : les **myofibrilles**.

Chaque myofibrille présente une alternance de disques (ou bandes) **sombres** (disque A) et de **disques clairs** ce qui donne une striation transversale de la fibre musculaire.

La coloration rouge du muscle squelettique est due à un pigment rouge proche de l'hémoglobine : la **myoglobine**.

3- Ultrastructure d'une myofibrille : doc 4 p 212

L'observation microscopique d'une myofibrille montre des unités appelées **sarcomères** délimités par deux **stries Z**.

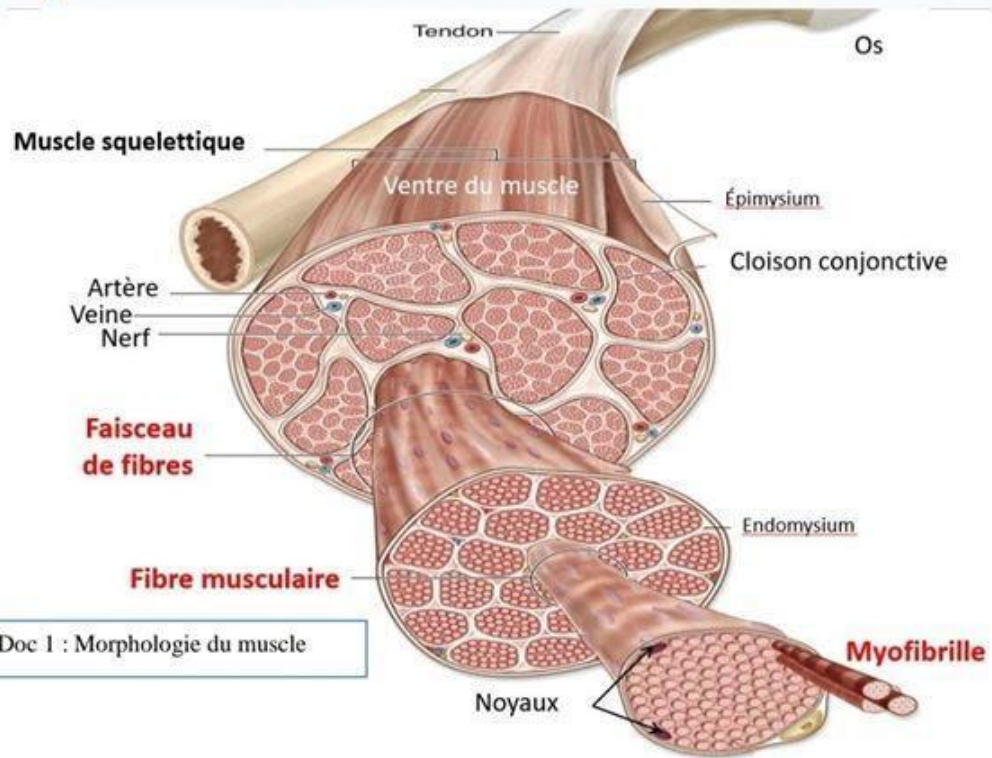
Le sarcomère est constitué de deux types de filaments :

- des filaments fins d'**actine** rattachés aux stries Z.
- des filaments épais de **myosine** localisés au niveau des disques sombres.

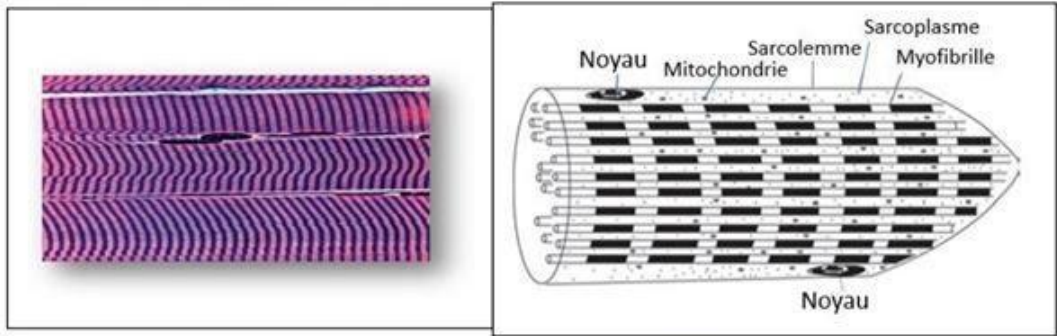
Dans chaque disque sombre les filaments épais sont entourés de filaments fins sauf dans la région centrale dite la **zone H**. Par contre les disques clairs ne contiennent que des filaments fins.

Le **sarcoplasme** situé entre les myofibrilles est riche en **mitochondries** et contient des inclusions de **glycogène**. (doc p 217)

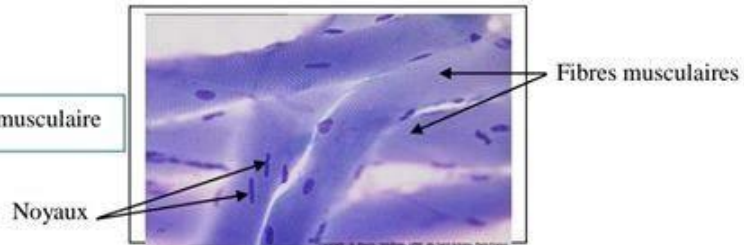
La membrane plasmique ou **sarcoleme** de la fibre musculaire présente des replis, appelés **tubules transverses**, pénétrant à l'intérieur de la fibre et entrant en contact avec un réticulum endoplasmique développé riche en Ca^{++} .

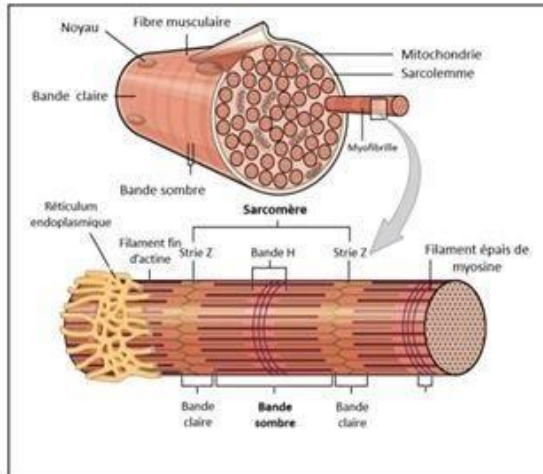


Doc 1 : Morphologie du muscle

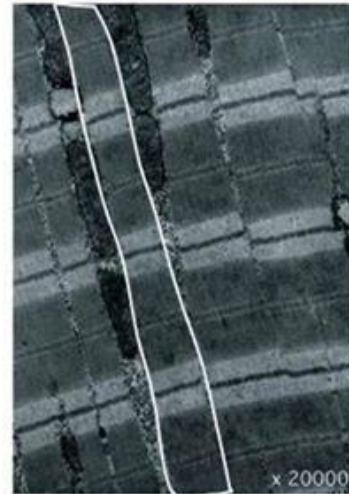


Doc 2 : Structure de la fibre musculaire

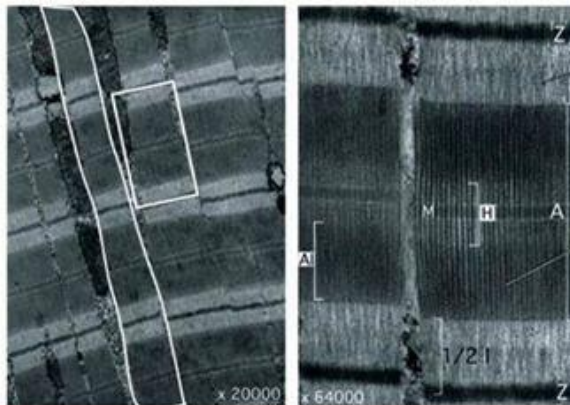




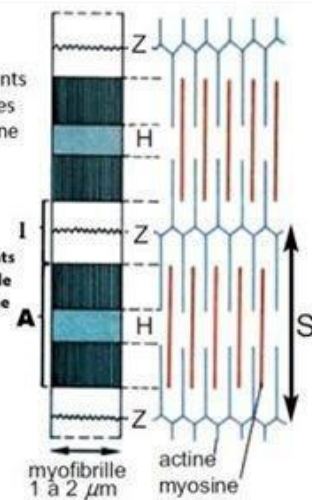
Doc 3 : Structure de la myofibrille

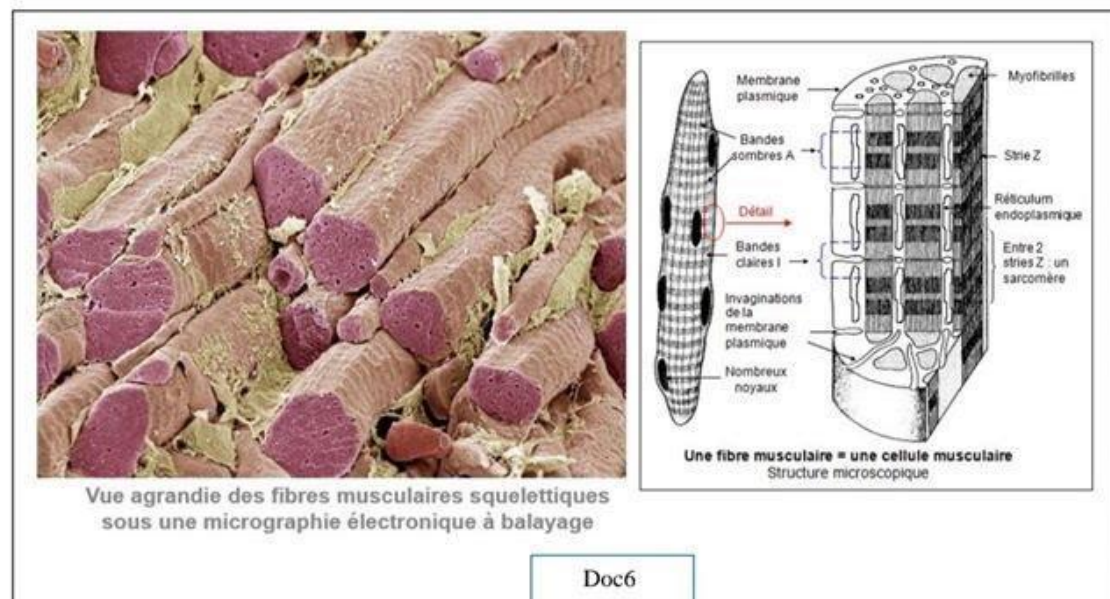
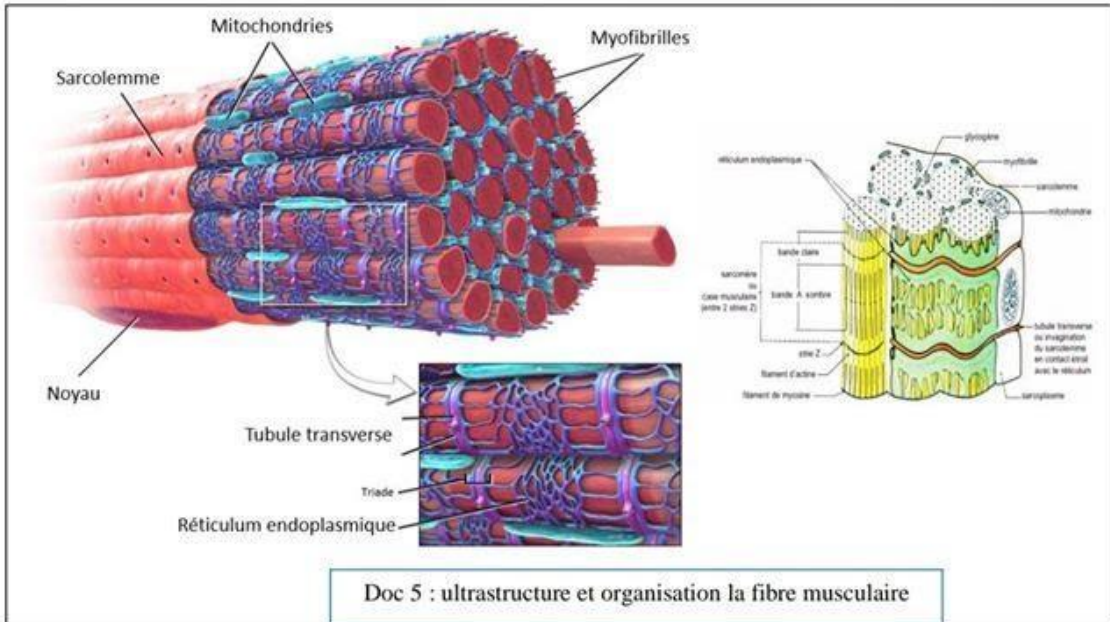


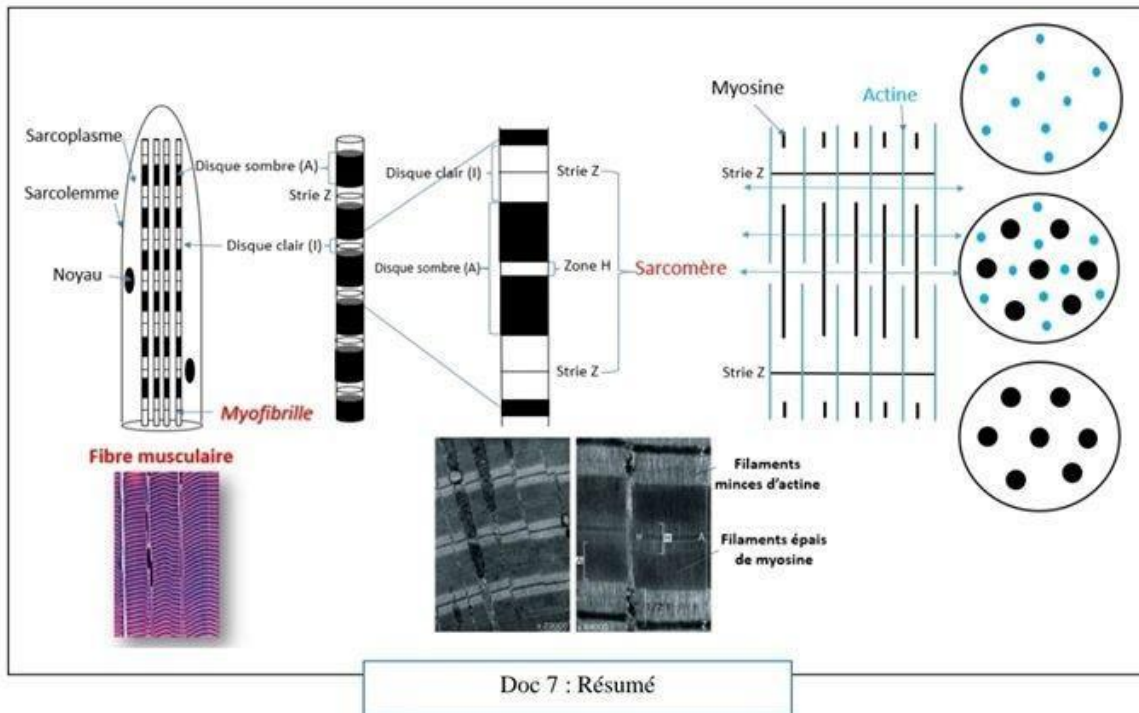
Observation de myofibrilles au microscope électronique



Doc 4 Observation de myofibrilles au microscope électronique









STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UNE SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE

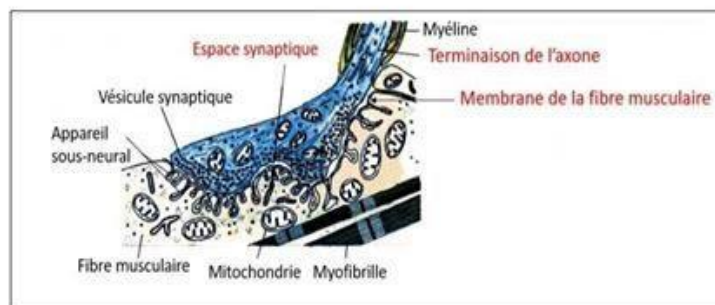
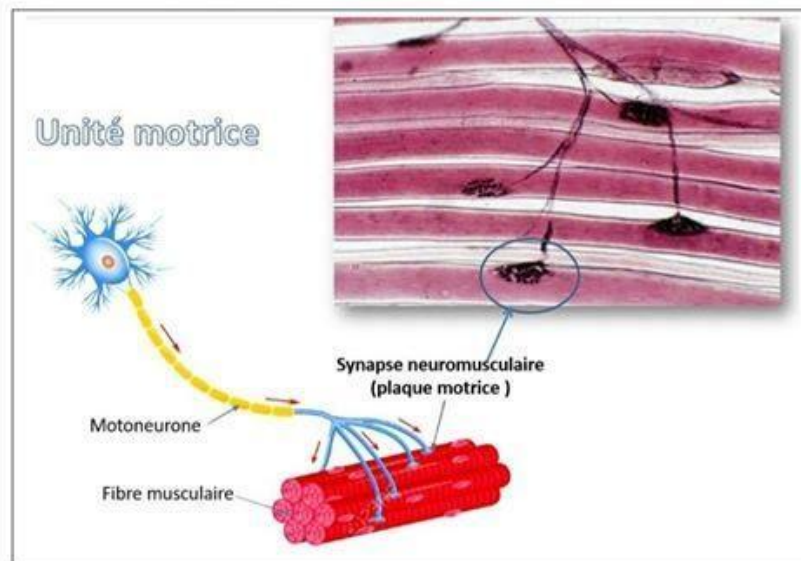
1- Structure de la synapse neuromusculaire : doc 5 et 6 p212

La synapse neuromusculaire ou **plaque motrice** comporte:

- une membrane présynaptique appartenant à la fibre nerveuse motrice
- une membrane postsynaptique appartenant à la fibre musculaire
- la fente synaptique : l'espace qui sépare les deux membranes.

L'ensemble formé par les fibres musculaires et le motoneurone qui les innerve est appelé : **unité motrice**.

Rq: Plus le nombre d'unités motrices est élevé, plus la contraction est importante.



Ultrastructure d'une plaque motrice



2- Fonctionnement de la plaque motrice :

Activité p212 :

a- Les phénomènes électriques au niveau de la plaque motrice :

- L'application d'une stimulation S1 donne au niveau de la membrane de la fibre musculaire une dépolarisation appelée : potentiel de la plaque motrice (PPM) dont l'amplitude diminue en se propageant le long de la fibre musculaire (c'est un potentiel local).
- L'application d'une stimulation S2 donne au niveau de la membrane de la fibre musculaire un PPM qui atteint le seuil et déclenche un potentiel d'action musculaire (PAm).
- Le PAm se propage le long de la fibre musculaire avec une amplitude constante.

⇒ Les caractéristiques fonctionnelles de la plaque motrice :

- o elle est toujours excitatrice,
- o il n'y a pas de sommation : 1PA neuronique donne toujours un PAm

b- Le mécanisme de la transmission neuromusculaire :

Activité p 214 :

Exp 1 : la stimulation de l'axone moteur donne en R1 (membrane de la fibre musculaire) un PAm propageable.

Exp 2 : Le dépôt d'une microgoutte G1 d'acétylcholine sur la membrane musculaire donne un PPM inférieur au seuil.

Le dépôt d'une microgoutte G2 d'acétylcholine sur la membrane musculaire donne un PPM qui atteint le seuil et déclenche un PAm.

⇒ Le fonctionnement de la plaque motrice nécessite une forte concentration d'un neurotransmetteur : l'**acétylcholine**.

Remarque : dans les conditions physiologiques normales, un seul PA donne toujours un PAm

Exp 3 :

Au cours de la transmission neuromusculaire l'acétylcholine doit être rapidement inactivée : la fixation de l'ACH a une durée limitée.

Exp 4 : l'ACH doit être déposée sur la membrane et non à l'intérieur de la fibre musculaire.

Exp 5 : la toxine empêche l'action de l'ACH en occupant ses récepteurs localisés à la surface de la membrane postsynaptique d'où la paralysie du muscle.

⇒ Exp 4 et 5 : L'ACH agit donc au niveau de la membrane de la fibre musculaire en se fixant sur des récepteurs spécifiques.

Les étapes de la transmission neuromusculaire :

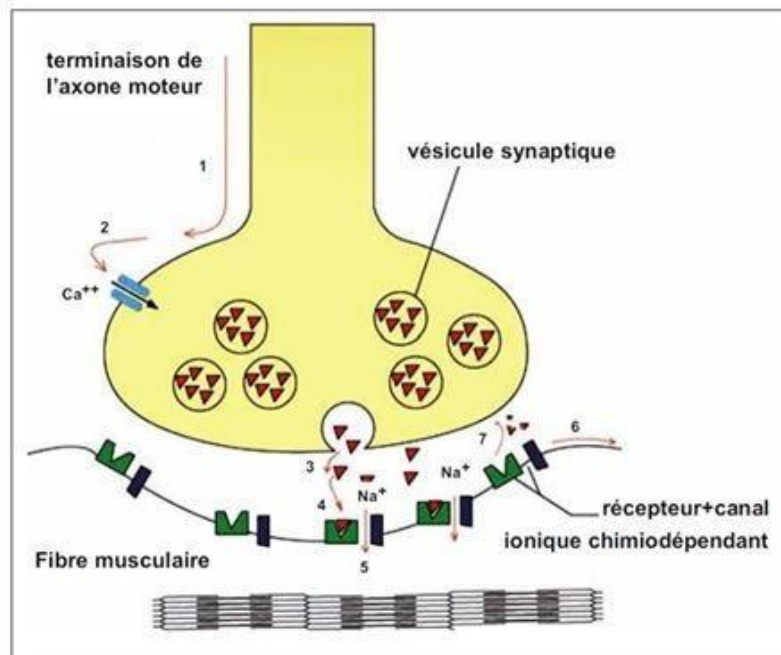
- 1- Arrivée du PA au niveau de la membrane présynaptique
- 2- ouverture des canaux voltage dépendants Ca^{++} et entrée massive d'ions Ca^{++} à travers la membrane présynaptique.
- 3- Exocytose des vésicules synaptiques et libération d'acétylcholine dans la fente synaptique.
- 4- l'acétylcholine se fixe sur des récepteurs membranaires spécifiques.
- 5- Ouverture des canaux chimiodépendants perméables aux ions Na^+ et K^+ d'où une entrée massive de Na^+ et une sortie de K^+
- 6- Le mouvement des ions à travers la membrane postsynaptique entraîne sa dépolarisation



- lorsque cette dépolarisation atteint le seuil, elle déclenche la naissance d'un potentiel d'action musculaire postsynaptique qui va se propager le long de la membrane de la fibre musculaire

7- hydrolyse de l'acétylcholine, fixée sur les récepteurs postsynaptiques, par une enzyme l'acétylcholinestérase, présente à forte concentration dans la fente synaptique.

Fermeture des canaux à Na^+ chimiodépendants et recapture par la terminaison présynaptique de la choline libérée par l'hydrolyse (la choline peut ainsi servir à la synthèse de nouvelles molécules d'acétylcholine).



Les étapes de la transmission neuromusculaire



Mécanisme de la contraction musculaire

Voir doc 11 p215

La transmission du message nerveux au niveau de la plaque motrice donne naissance à des PA musculaires qui se propagent le long de la membrane de la fibre musculaire et déclenchent des contractions de cette fibre, celle-ci est donc **excitable** et **contractile**.

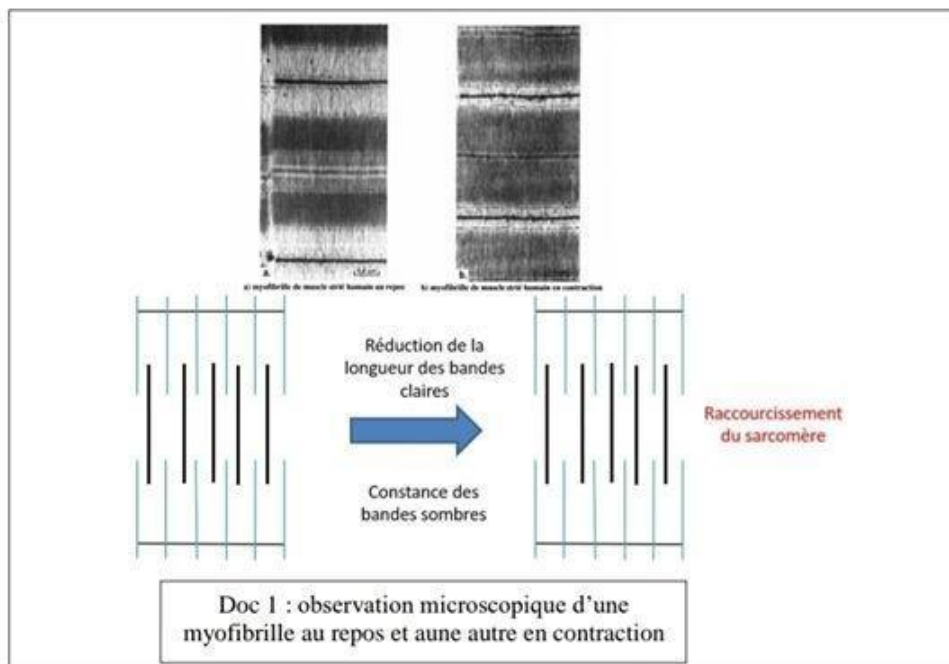
La contraction élémentaire d'une fibre musculaire, suite à sa stimulation efficace, est une secousse isolée très brève (0,1 seconde), qui comprend deux phases : une phase de **contraction** et une phase de **relâchement**. Elle est enregistrée sous forme de **myogramme**.

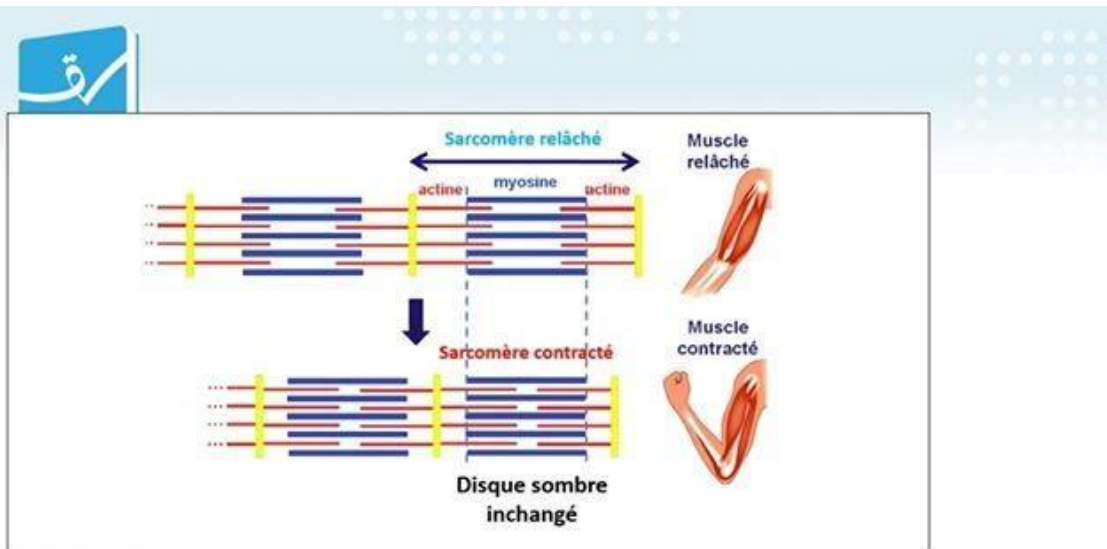
L'enregistrement simultané de **l'électromyogramme** (PAm) et du **myogramme** d'une secousse musculaire isolée, montre que le PAm précède la contraction, il se situe dans la phase de latence L : **c'est le PAm qui déclenche la contraction musculaire**.

1- Mécanisme de la contraction : voir doc p 221

La comparaison entre un sarcomère contracté et un sarcomère au repos, montre que la contraction se traduit par un raccourcissement des sarcomères, une réduction de la longueur des bandes claires et une constance des bandes sombres. Ceci prouve qu'il y a, au cours de la contraction, un **glissement** des myofilaments d'actine par rapport aux myofilaments de myosine.

Le sarcomère est donc **l'unité fonctionnelle** de la fibre musculaire.





2- Les manifestations thermiques de la contraction : doc 12 p215

Au cours d'un exercice musculaire, le muscle produit de la chaleur. Cette production se fait en deux temps :

- **une chaleur initiale** : elle se dégage pendant la secousse et comprend (dans le cas d'une secousse musculaire isolée) la chaleur de **contraction** et la chaleur de **relâchement**.
- **une chaleur retardée** : qui se dégage lentement après la secousse, elle est moins élevée mais dure plus longtemps (qqz mins)

3- Origine de l'énergie musculaire :

Activité doc 13 p 216

Analyse de l'expérience : Au cours de l'activité musculaire l'utilisation de l'oxygène et du glucose augmente :

En effet, au cours de la **respiration cellulaire** (au niveau des mitochondries), la dégradation du glucose en présence d'oxygène aboutit à la production d'énergie stockée sous forme de composés phosphorés riche en énergie : telque l'ATP.

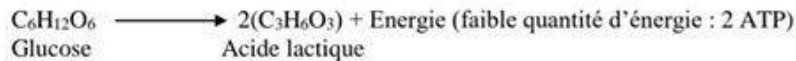


La fibre musculaire utilise-t-elle l'ATP comme source d'énergie ?

Activité doc 14 p216

Exp 1 : un muscle isolé maintenu dans un milieu anaérobie est capable de se contracter lorsqu'on l'excite.

Constatation : En absence d'oxygène le glucose peut subir une transformation pour libérer de l'énergie (avec accumulation de l'acide lactique) : c'est la **fermentation lactique** :





Exp 2 : des myofibrilles isolées (donc pas de mitochondrie et pas de glycolyse) et placées dans un liquide riche en ATP et en Ca^{++} se contractent spontanément. Cependant l'inhibition de l'hydrolyse de l'ATP et de l'action des ions Ca^{++} arrête la contraction :

Constatations :

- Le glucose n'est pas la source immédiate de l'énergie de la contraction musculaire. L'énergie servant au glissement des filaments d'actine entre les filaments de myosine provient de l'hydrolyse de l'ATP présent dans le muscle.



Une partie de l'énergie de cette réaction est transformée en énergie mécanique sous forme de contraction, l'autre partie est dissipée sous forme de **chaleur initiale de contraction**.

- la contraction musculaire fait intervenir les ions Ca^{++} .

4- Régénération de l'ATP :

Un muscle au travail utilise continuellement de l'ATP. Comme la quantité d'ATP dans la fibre musculaire est limitée, la fibre doit reconstituer ses réserves en ATP.

Par quelles voies se fait la régénération de l'ATP ?

Activité : doc 15 p218

Exp A : après la contraction :

- il y a diminution du glycogène et augmentation de l'acide lactique. Il s'agit d'une contraction se faisant en partie en milieu anaérobie.
- Les concentrations de l'ATP et du PC restent inchangés.

La concentration d'ATP musculaire reste constant même après la contraction Il existe donc des voies de régénération d'ATP dans le muscle.

Exp B :

Si on bloque la glycolyse, il n'y a ni consommation du glucose (donc du glycogène), ni la formation des produits de la glycolyse, c'est à dire l'acide lactique et l'ATP. L'ATP consommé a été régénéré à partir de la réaction :



Faute d'ATP disponible suffisant (absence de la glycolyse), la PC n'est pas régénérée et sa concentration diminue.

Le blocage de la glycolyse provoque l'arrêt de la respiration cellulaire source principale d'ATP. Or, une partie de l'ATP produite par respiration est utilisée dans la régénération de PC c'est pourquoi sa concentration diminue dans l'exp B.

Exp C : si la glycolyse et l'intervention du PC sont bloqués, il n'y a plus de source disponible et suffisante pour régénérer l'ATP consommé ce qui explique l'épuisement total du stock de l'ATP.

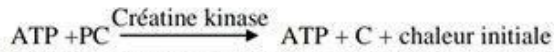


Conclusion :

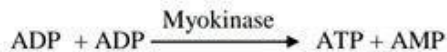
Il existe deux voies de régénération d'ATP dans le muscle :

- les voies rapides de régénération de l'ATP :

Moins de 30s après une contraction, deux réactions de régénération de l'ATP se produisent :



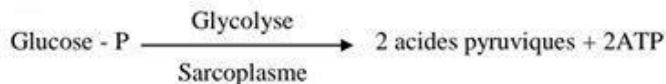
PC : phosphocréatine : composé phosphorylé riche en énergie et présent en abondance dans le muscle.
C : créatine



La réaction entre l'ATP et la phosphocréatine s'accompagne aussi d'un dégagement de **chaleur initiale de relâchement**.

- les voies de régénération lente de l'ATP :

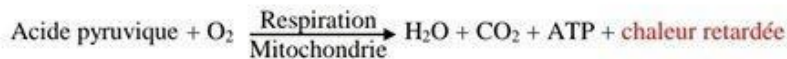
Le glycogène représente la réserve énergétique de la fibre musculaire, il peut libérer du glucose-P (Le glycogène donne par hydrolyse le glucose qui en présence de l'acide phosphorique donne le glucose phosphorylé) qui donne deux molécules d'acide pyruvique (molécule en C3) avec production de deux ATP selon la réaction :



Deux cas peuvent se présenter :

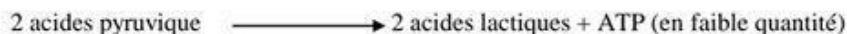
✓ **en présence d'oxygène :**

L'acide pyruvique est oxydé complètement dans les mitochondries pour former beaucoup d'ATP avec libération de CO₂, d'eau et de chaleur retardé : c'est la respiration cellulaire qui se déroule selon la réaction :



✓ **en absence d'oxygène :**

L'acide pyruvique se réduit pour former l'acide lactique et une faible quantité d'ATP : c'est la **fermentation lactique** :

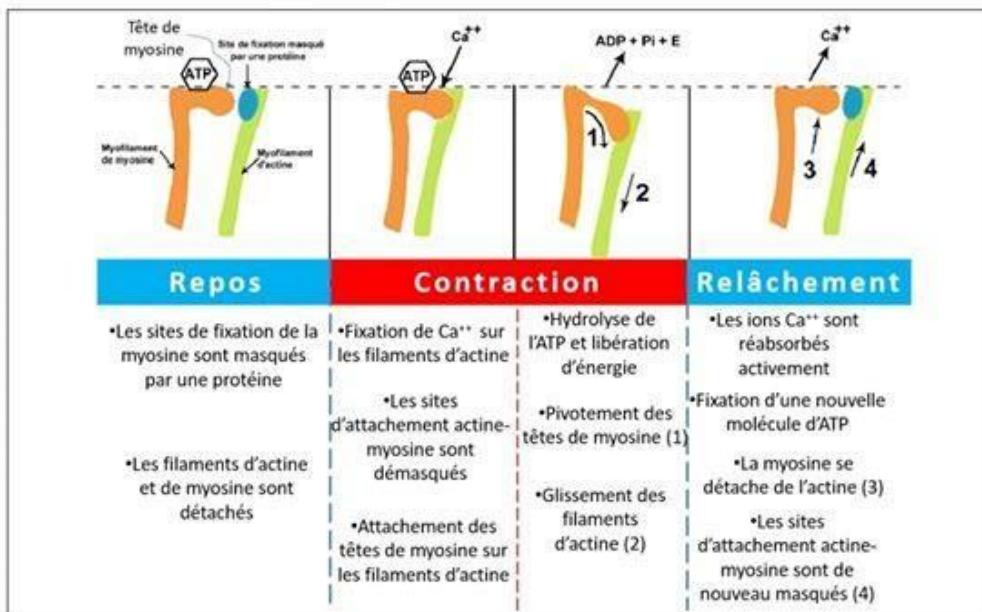




5- Conversion de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique (contraction) : doc p217

Le mécanisme de glissement des filaments d'actine entre les filaments de myosine au cours de la contraction musculaire est expliqué de la manière suivante :

- la transmission du message nerveux donne naissance au niveau de la fibre musculaire à des potentiels d'action musculaires qui atteignent les cavités du réticulum par les invaginations (tubules transverses) du sarcolemme.
- diffusion passive des ions Ca^{++} des citernes du réticulum vers le hyaloplasme et les myofibrilles.
- ces ions Ca^{++} libérés se fixent sur les filaments d'actine et démasquent les sites d'attachement actine-myosine permettant l'attachement fixation des têtes de myosine sur des sites localisés sur les filaments d'actine.
- cette fixation déclenche l'activité ATPasique de la myosine et par conséquent l'hydrolyse de l'ATP et la production d'énergie.
- une partie de l'énergie libérée provoque le pivotement des têtes des molécules de myosine ce qui entraîne le glissement des filaments d'actine par rapport aux filaments de myosine, d'où le raccourcissement du sarcomère et donc la contraction.
- la fixation d'une nouvelle molécule d'ATP provoque la séparation de la myosine de l'actine.
- en absence de nouveau potentiel d'action musculaire, le Ca^{++} est de nouveau accumulé dans le réticulum par transport actif et le muscle revient à son état initial. Ce retour est un phénomène passif (relâchement)





D'une manière plus simple

- 1- Le PAm atteint les cavités du réticulum par les invaginations (tubules transverses) du sarcolemme qui arrivent à proximité de ces cavités,
- 2- Diffusion des ions Ca^{2+} vers le hyaloplasme et les myofibrilles,
- 3- Ces ions Ca^{2+} permettent la fixation des têtes de myosine sur des sites localisés sur les filaments d'actine, et démasque les sites d'attachement actine-myosine, ce qui permet :
 - * l'attachement des têtes de myosine sur les filaments d'actine,
 - * l'activation de la propriété ATPasique de la myosine,
- 4- Hydrolyse de l'ATP ce qui donne $\text{ADP} + \text{P}$ et libère de l'énergie,
- 5- L'énergie produite entraîne le mouvement des têtes de myosine vers la ligne M (centre du sarcomère) d'où le glissement des filaments d'actine et le raccourcissement du sarcomère.
- 6- L'ion Ca^{2+} est réabsorbé activement (grâce à l'ATP), la myosine se détache de l'actine.
- 7- Les sites d'attachement actine-myosine sont de nouveau masqués.
- 8- Le sarcomère revient passivement à sa longueur initiale. Ce retour est dû à la contraction du muscle antagoniste.

