

CHAPITRE 2 :

Rôle du muscle strié squelettique dans la conversion d'énergie

Introduction :

Au cours des réactions biochimiques de la respiration et de la fermentation, une bonne partie de l'énergie potentielle contenue dans les molécules organiques est convertie en énergie potentielle contenue dans l'ATP.

L'ATP est considéré comme une source d'énergie « chimique » puisqu'il est issu de processus biochimiques or certains types de tissus manifestent des éléments mécaniques tels que le muscle squelettique strié qui fait bouger notre corps ,donc les cellules composants ces tissus musculaire convertissent l'énergie « chimique » qu'est l'ATP en énergie « mécanique » lors du mouvement et en énergie thermique puisque il y a un dégagement de chaleur .

Problématique :

- 1- Quel est le mécanisme permettant au muscle d'exécuter des mouvements simples ou complexes ?
- 2- Quelles sont les structures intervenant lors de ces mouvements ?
- 3-Quels sont les phénomènes métaboliques responsables du mouvement musculaires et comment interviennent ils à l'échelle cellulaire ?
- 4- Quels sont les mécanismes de conversion de l'énergie au niveau de la fibre musculaire ?

I – étude expérimentale d'un mouvement musculaire

1- rappels anatomiques

3 types de tissus musculaires existent chez l'homme :

- **les muscles striés squelettiques :**

Les muscles striés squelettiques, comme leur nom l'indique, sont reliés au squelette par les tendons. La contraction de ces muscles permet le mouvement corporel.

- **le muscle cardiaque :**

Le muscle cardiaque est aussi un muscle strié et sa contraction permet de faire circuler le sang dans le réseau vasculaire. Le terme strié, comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre, est lié à l'alternance de bandes claires et sombres lorsqu'on observe ces cellules en microscopie.

- **les muscles lisses :**

Enfin, les muscles lisses (lisse en opposition à strié), vont être présents au niveau de nombreux organes. Tout d'abord, ils sont présents au niveau des organes creux comme par exemple l'estomac, les intestins, la vessie ou encore les vaisseaux sanguins et leur contraction permet d'assurer la propulsion du contenu de ces organes ou de réguler le débit à l'intérieur de ces organes en modifiant leur diamètre.

Ils constituent également les muscles pilomoteurs responsables de « la chair de poule » ou les muscles iridiens responsables de la contraction ou de la dilatation de l'iris.

Déduction : les contractions des muscles sont responsables des mouvements chez l'Homme

question : comment étudier d'une manière scientifique une contraction musculaire ?

2. protocole expérimental pour étudier une contraction musculaire :

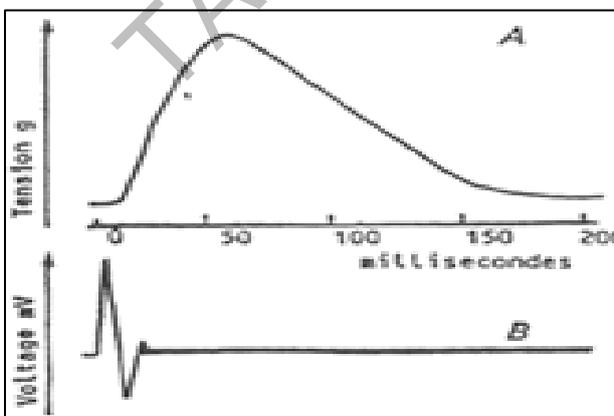
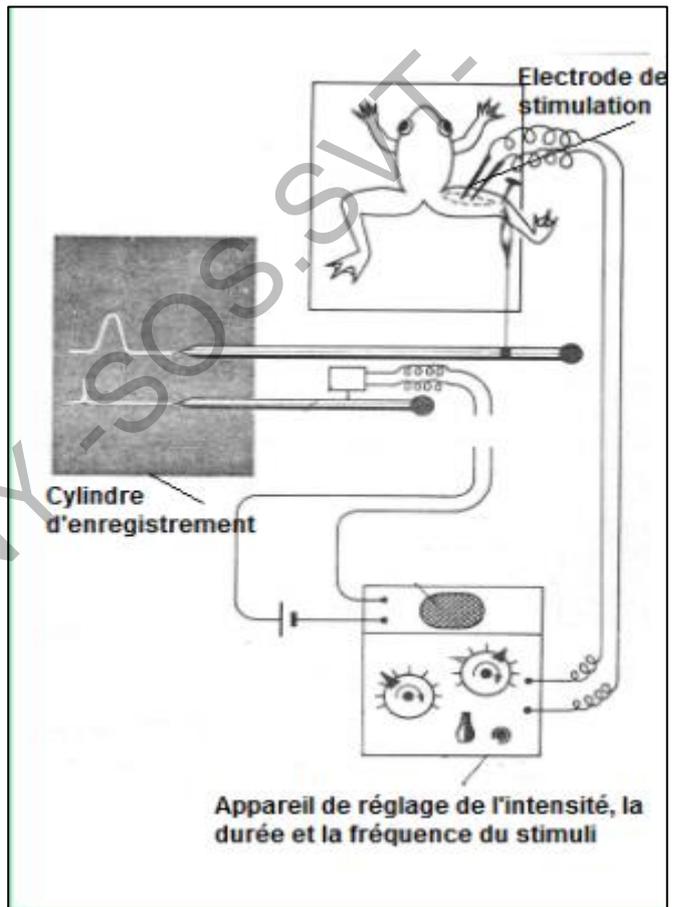
2-1Expérience 1 :

Il s'agit dans cette manipulation d'étudier la contraction d'un muscle squelettique de la grenouille (le gastrocnémien) en réponse à l'excitation de son nerf moteur (le sciatique).

Lorsqu'on stimule le muscle par une excitation électrique unique, il se produit un raccourcissement du muscle : (CONTRATION ou SECOUSSE MUSCULAIRE).

Cette réponse du muscle est enregistrée par un **myographe** (Le tracé obtenu est un **myogramme**).

On note trois phases :



- ◆ La phase de latence : n°
- ◆ la phase de contraction : n° _
- ◆ La phase de repos : n° _

La secousse musculaire isolée est la réponse d'un muscle à un seul stimulus égal ou au-dessus du seuil de stimulation. En réponse à cette stimulation le muscle se contracte rapidement puis se relâche. On peut identifier 3 phases :

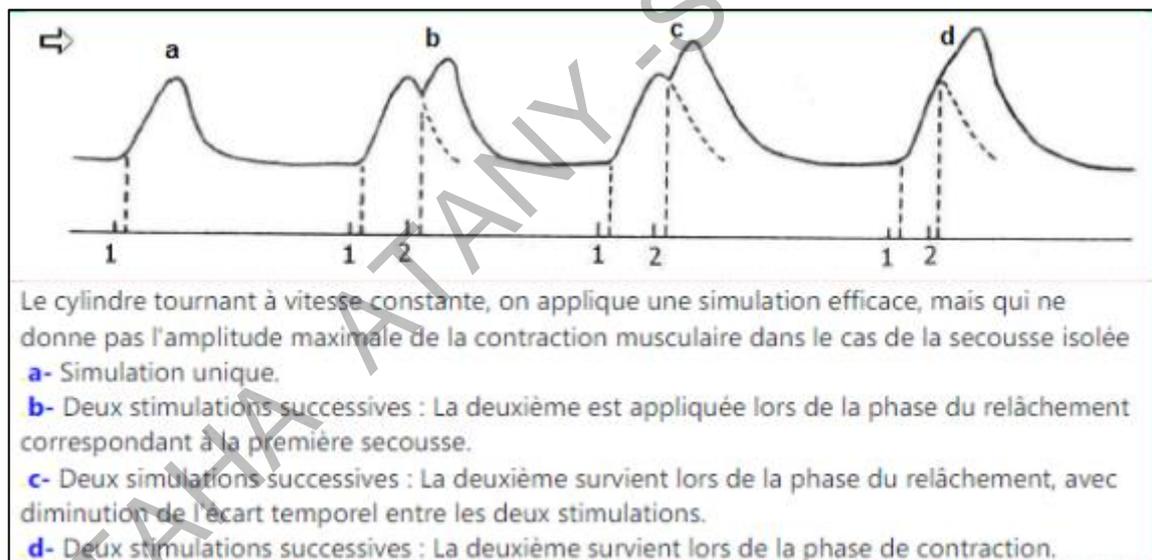
- La phase de latence : dure quelques millisecondes suivant la stimulation, elle correspond au temps nécessaire à l'arrivée de l'influx nerveux au muscle.
- La phase de contraction : c'est l'intervalle de temps entre le début du raccourcissement et son maximum. Sa durée est de 10 à 100 ms suivant les muscles.
- La phase de relâchement : la contraction ne s'exerce plus, le raccourcissement diminue pour revenir à sa valeur de repos. La durée de relâchement est toujours supérieure à celle de la contraction.

Déduction : cette expérience met en évidence deux principales caractéristiques des tissus musculaires

Excitabilité : un muscle est dit excitable puisque tout stimuli quel que soit sa nature électrique ou mécanique du muscle squelettique strié à pour réponse une contraction musculaire.

Contractilité : le muscle strié se contracte c'est-à-dire que son volume diminue puis se relâche pour revenir à ses dimensions d'origine.

2-2Expérience 2 :



Si les stimulations sont appliquées dans un court intervalle, il y a fusion des secousses musculaires. La deuxième contraction sera d'une amplitude supérieure à la première car la deuxième stimulation a lieu avant que le muscle ne se relâche complètement. - d : lorsque la deuxième stimulation est très rapprochée, la fusion des secousses est complète. - On parle alors de la sommation, elle est partielle (b et c) ou totale (d)

- **Définition de tonus musculaire** : Au repos, le muscle est légèrement contracté pour permettre le maintien de la posture, c'est la **tonicité** du muscle
- **Définition de téτανisation** : Lors du travail musculaire, le muscle reçoit une succession d'excitations nerveuses lui permettant de mobiliser de plus en plus de fibres musculaires et de se maintenir à l'état contracté pendant l'effort, c'est le **tétanos**.

2-3Expérience 3 :

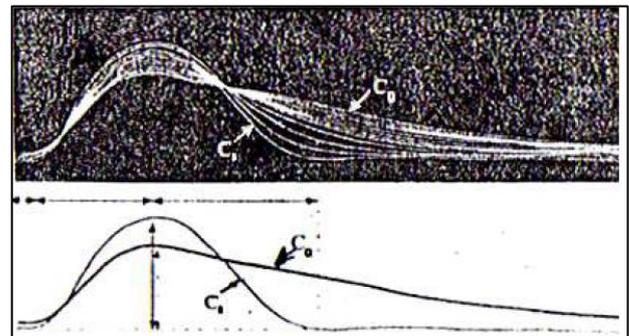
La stimulation répétitive d'un muscle entraîne une fusion plus ou moins complète des contractions élémentaires (TETANOS IMPARFAIT et PARFAIT) dont l'amplitude est supérieure à celle d'une contraction unique maximale.

Lorsqu'on applique au muscle plusieurs stimulations à des fréquences de plus en plus rapides, on obtient les enregistrements suivants :

| | | |
|-------------|--|---|
| Schéma | | |
| Titre | | |
| description | <p>Si la fréquence des excitations fait en sorte que la deuxième excitation arrive au muscle pendant la phase de relâchement de la secousse relative à l'excitation précédente, le myogramme obtenu ne donne que les secousses.</p> | <p>Si la fréquence des excitations fait en sorte que la deuxième excitation arrive au muscle pendant la phase de contraction de la secousse relative à l'excitation précédente, la sommation étant totale, le myogramme augmente d'amplitude de façon régulière et présente un plateau régulier. c'est le téтанos parfait.</p> |

2-4Expérience 4 :

Lorsque le muscle se fatigue après avoir subi une série d'excitations successives, l'amplitude de la réponse devient faible et la durée de la relaxation devient plus longue



3. conclusions :

le muscle squelettique strié effectue les mouvement en se contractant ,il est donc contractile et excitable

chaque contraction est composée de trois phases ; latence, contraction, relâchement.

Selon le nombre d'excitations et leurs phase d'application, le muscle peut faire des sommations parfaites ou imparfaites qui donnent lorsqu'elles sont successives un téтанos qui varie selon le type de sommation

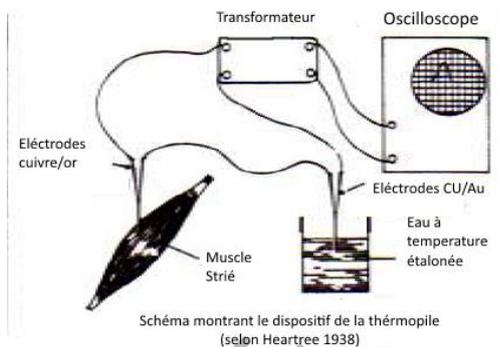
Question : quels sont les phénomènes métaboliques liés à la secousse musculaire et comment les mettre en évidence ?

II. Les phénomènes thermiques et énergétiques liés à la contraction musculaire :

1-mise en évidence des phénomènes thermiques :

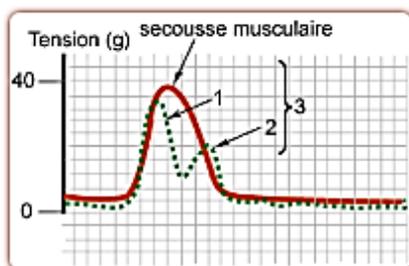
1-1 dispositif expérimental : la thermopile

La thermopile est constituée de deux électrodes ou aiguilles électrothermiques composés chacun de deux métaux différents (laiton ou nickel ou or). La différence de chaleur entre les deux aiguilles génère une différence de tension proportionnelle à la chaleur associée à la contraction musculaire

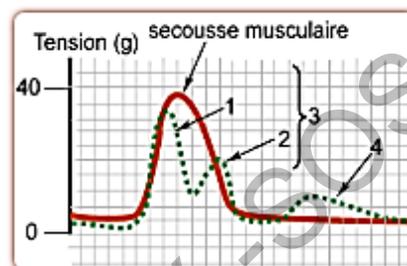


1-2 Analyse des résultats :

Toute activité mécanique est accompagnée d'un dégagement de la chaleur et d'un réchauffement de l'organisme. On peut mesurer la quantité de la chaleur dégagée au cours d'une activité mécanique.



Dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu riche en oxygène (milieu aérobie)



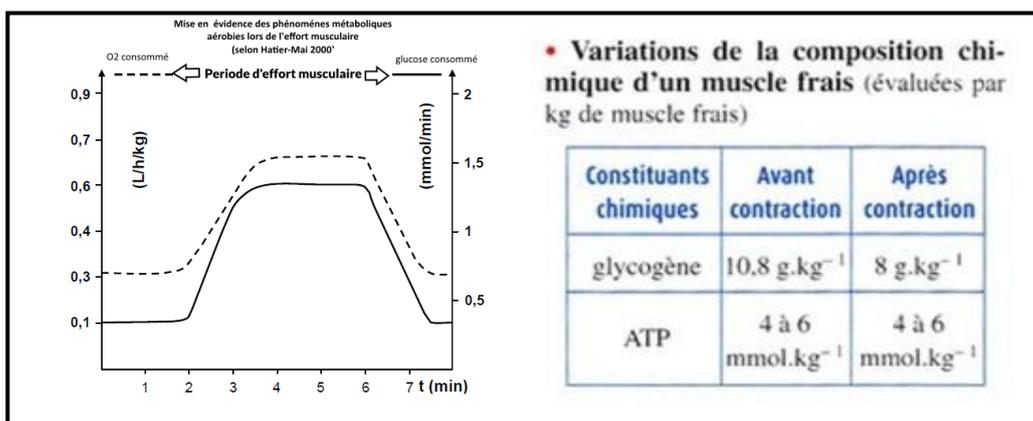
Dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu pauvre en oxygène (milieu anaérobie)

- 1: Chaleur de contraction
- 2: Chaleur de relâchement
- 3: Chaleur initiale
- 4: Chaleur retardée

Le dégagement de la chaleur au cours d'une activité mécanique confirme que le muscle est le siège des réactions chimiques exothermiques (productrices d'énergie thermique). La chaleur retardée n'est dégagée que dans un milieu aérobie donc les fibres musculaires se produisent deux types de réactions chimiques exothermiques. L'origine de ces réactions est métabolique donc il y a bien une consommation de l'ATP.

La chaleur initiale se dégage pendant la secousse musculaire, et comporte :
 + La chaleur de contraction, dégagée au cours de la phase de contraction.
 + La chaleur de relâchement, dégagée au cours de la phase de relâchement.
 + La chaleur retardée se dégage lentement après la secousse

2-mise en évidence des phénomènes énergétiques :



Au cours de l'activité physique, les réserves du muscle en glycogène diminuent. La consommation du glucose et de l'oxygène augmente ainsi que le dégagement du CO₂. Ces phénomènes chimiques traduisent l'oxydation du glucose par le processus de la respiration cellulaire, pour produire l'énergie nécessaire à la contraction musculaire. En milieu anaérobie la fermentation vient remplacer la respiration.

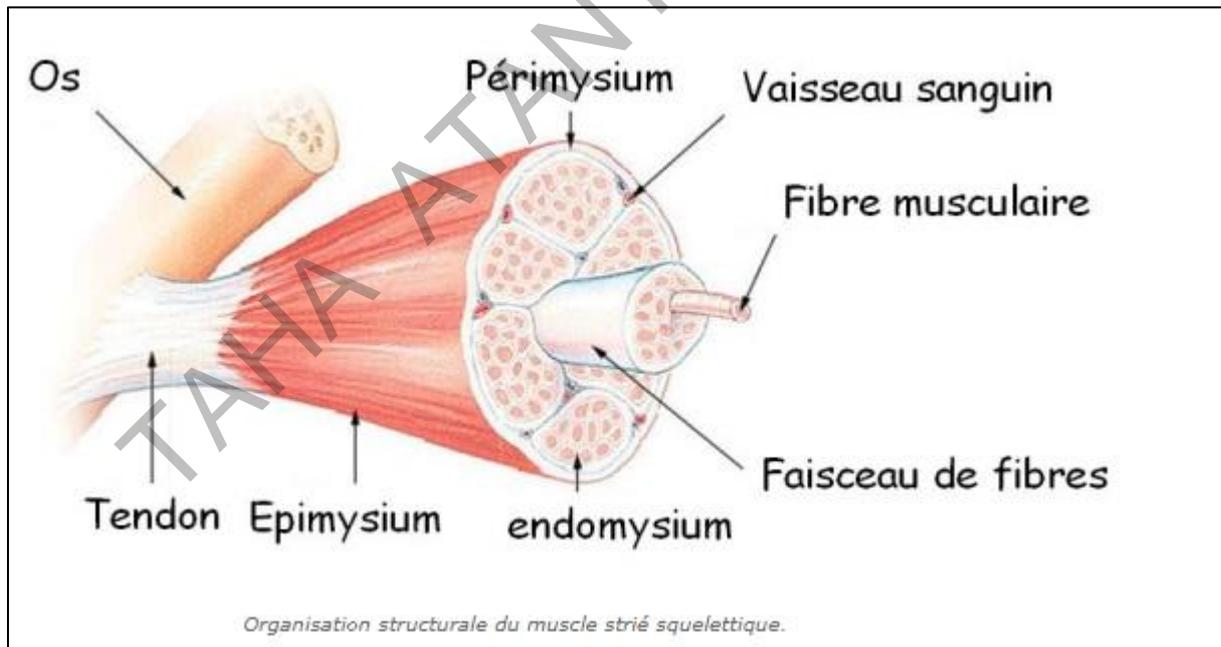
III. Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique :

1-structure du muscle strié

Le muscle squelettique est composé d'un ventre et de tendons assurant les attaches sur les os. Dans le ventre, les faisceaux de fibres musculaires sont emballés dans le tissu conjonctif.

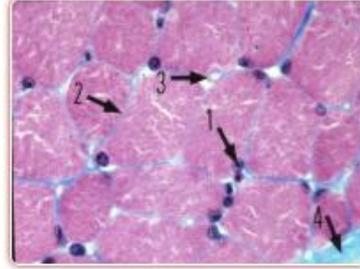
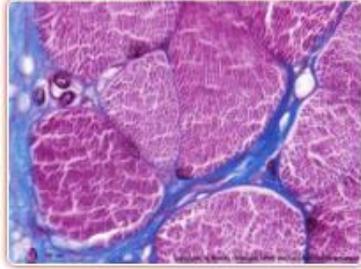
D'un point de vue structural, le muscle strié squelettique est formé d'un grand nombre de cellules allongées, les fibres musculaires. La fibre musculaire a un diamètre variant de 10 à 100 µm et une longueur pouvant dépasser 10 centimètres

Les réseaux du tissu conjonctif s'unissent à chaque extrémité au niveau des tendons solidement fixés à la couche externe de l'os. L'irrigation des muscles est assurée par un réseau d'artérioles, de capillaires et de veinules. Ce réseau permet l'apport de nutriments et d'oxygène,

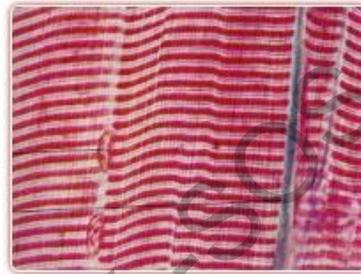
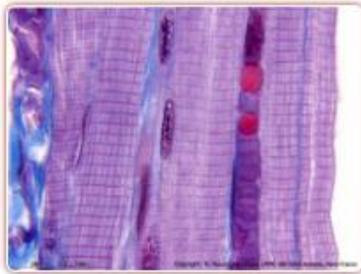


Les fibres musculaires sont des cellules allongées et différenciées limitées par une membrane appelée **sarcolemme**. Le cytoplasme appelé **sarcoplasme** contient plusieurs **noyaux périphériques** et une **double striation** centrale.

En microscopie optique, la fibre musculaire montre un aspect strié dû aux myofibrilles, d'où le qualificatif affecté à ce type de muscle. Les **myofibrilles** forment des cylindres disposés parallèlement formés



des coupes transversales des muscles squelettiques striés montrant des fibres musculaires de diamètres différentes. Les noyaux périphériques en (1) Les fibres musculaires sont séparées d'un tissu conjonctif (2 et 4) qui contient des capillaires sanguins (3)



Des coupes longitudinales des muscles squelettiques montrant des fibres musculaires parallèles et striées contenant plusieurs noyaux périphériques.

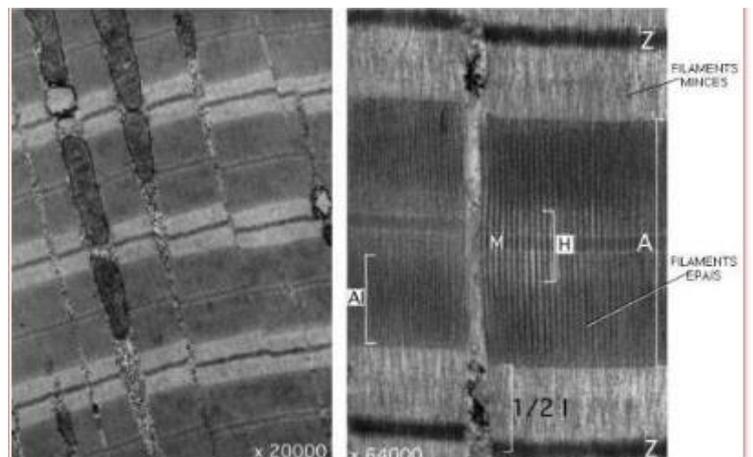
d'une alternance des **bandes sombres** appelées **disques A** et des **bandes claires** appelées **disques I**. Chaque disque **sombre (A)** présente au milieu une zone claire appelée **strie ou bande H** et chaque disque clair (I) présente un trait sombre appelé **strie Z**

Une **striation longitudinale** déterminée par la disposition parallèle de toutes les **myofibrilles** d'une même fibre musculaire

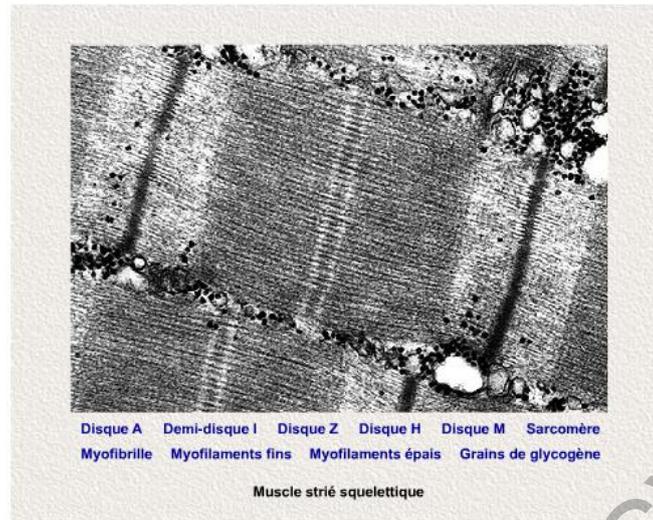
Une **striation transversale répétitive** déterminée par la superposition des bandes A, des bandes I, des stries Z et des stries H de toutes les myofibrilles d'une même fibre musculaire

2 -Ultrastructure de la fibre musculaire

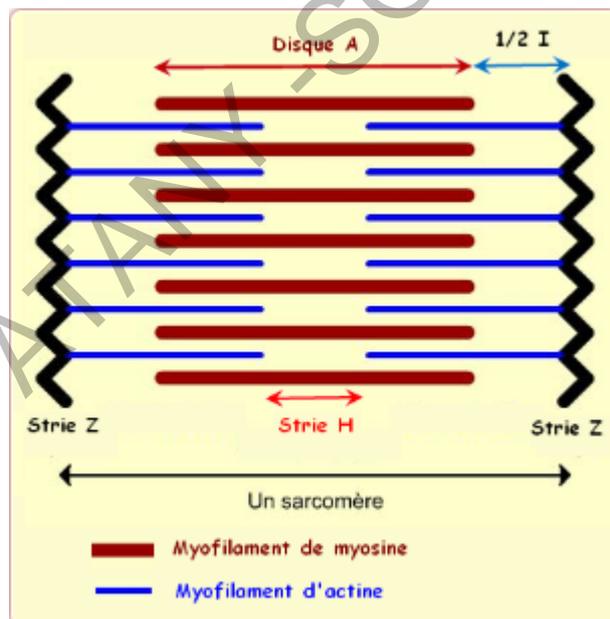
Le microscope électronique montre que les myofibrilles sont formées par deux types de myofilaments protéiques: les myofilaments de myosine et les myofilaments d'actine. Les myofilaments de myosines sont localisés uniquement au niveau des disques sombres A. Les myofilaments d'actine sont localisés au niveau des disques sombres A et au niveau



des disques claires I mais ils sont absents au niveaux des stries H.



Chaque myofibrille est constituée d'un faisceau de filaments de myosine et de filaments d'actine. La zone comprise entre deux stries Z successives constitue l'unité fonctionnelle de la myofibrille. C'est **le sarcomère**



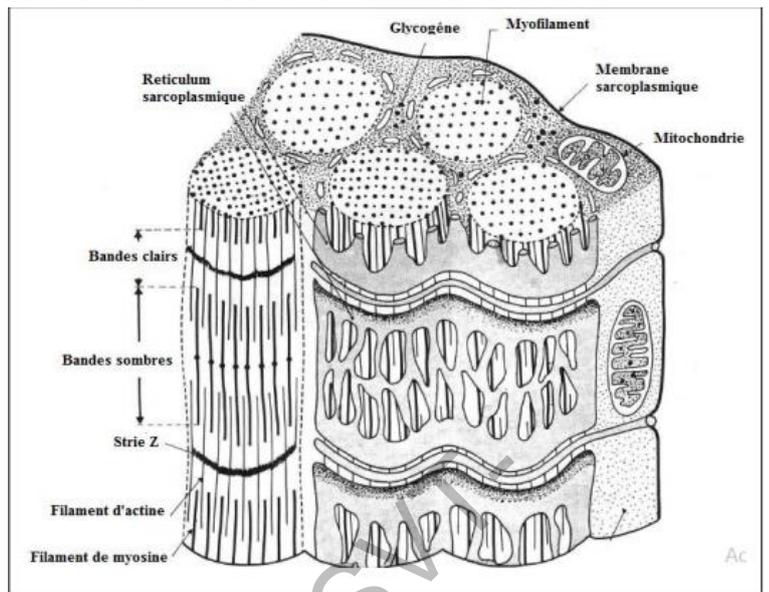
Disque A : Bandes sombres (A = Anisotropique), formés de filaments épais constitués d'une protéine appelé Myosine. Au milieu de la bande sombre (A), on trouve une bande relativement claire. C'est la bande H

Disque I : Bandes claires (I = Isotropique) , formés de filaments fins constitués d'une protéine appelé Actine . Au milieu de la bande claire (I), on trouve ce qu'on appelle la strie Z.

Zone comprise entre deux stries Z successives : sarcomère, l'unité fonctionnelle du myofibrille.

3-organisation de la fibre musculaire : vue d'ensemble

Donc d'après ce schéma si contre la fibre musculaire est un ensemble de myofibrilles, chaque myofibrille est une succession de sarcomères. Les myofibrilles se situent au centre de la fibre musculaire dans le sarcoplasme ou on trouve des réserves de glycogène ainsi que des mitochondries, alors que le réticulum sarcoplasmique est riche en calcium Ca^{2+} .

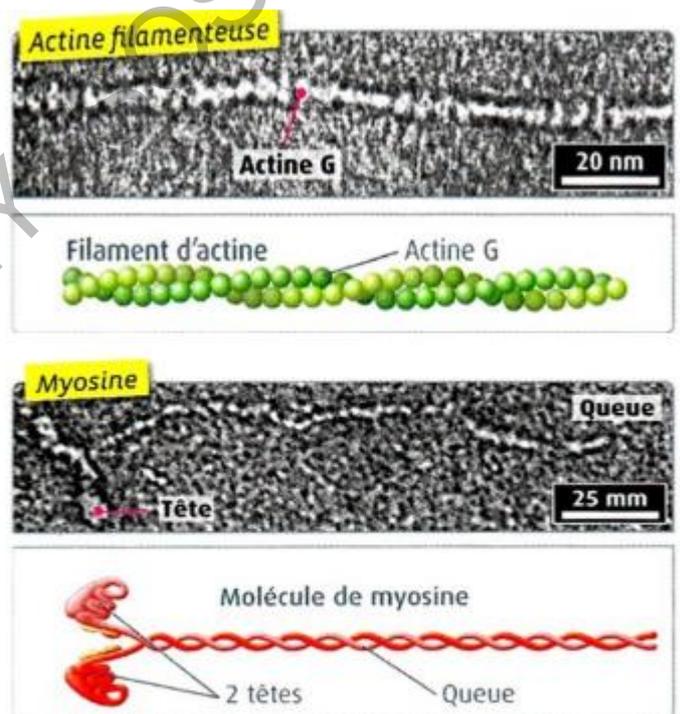


4- les constituants moléculaires des myofilaments

Les filaments fins, composés d'un assemblage de molécules d'actines globulaires organisées en 2 chaînes enroulées l'une autour de l'autre

Le filament fin d'actine est constitué de trois types de protéines : l'actine, la troponine et la tropomyosine.

Les filaments épais, composés de molécules de myosine accolées les unes aux autres, avec les têtes orientées vers l'extérieur pour permettre la liaison aux filaments d'actine



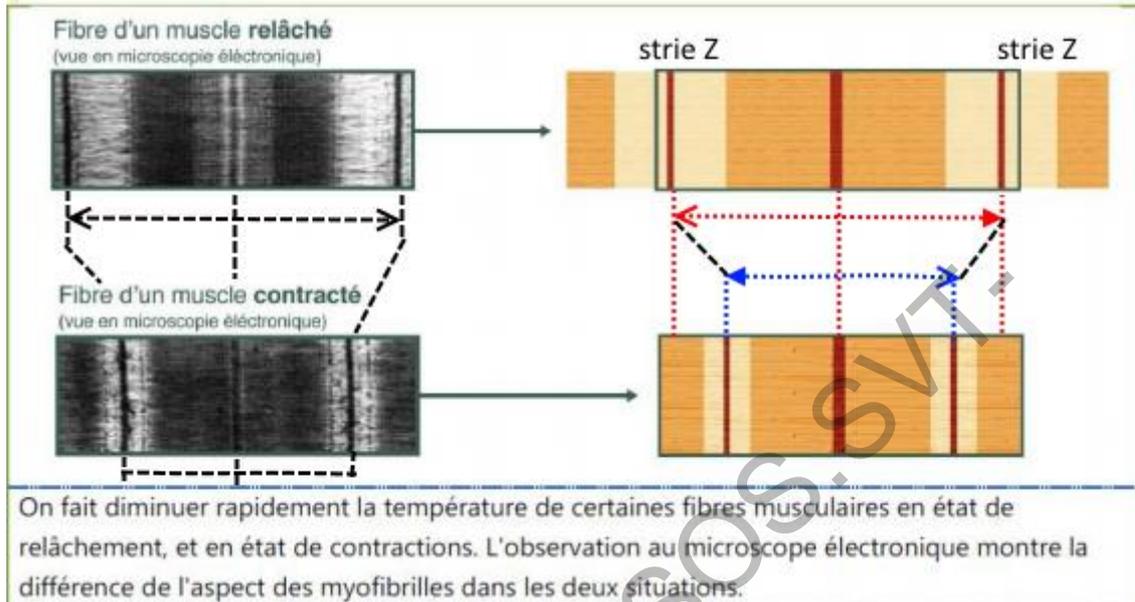
Documents extraits du manuel de SVT spé BELIN 2012

IV. Mécanisme de la contraction musculaire :

1. Le glissement des myofilaments :

1-1 Observations

On observe des myofibrilles appartenant à la même fibre musculaire dans deux états distincts : on était de contraction et en relâchement, la figure qui suit présente les photos prises au microscope électronique du même sarcomère ainsi que une représentation schématique :



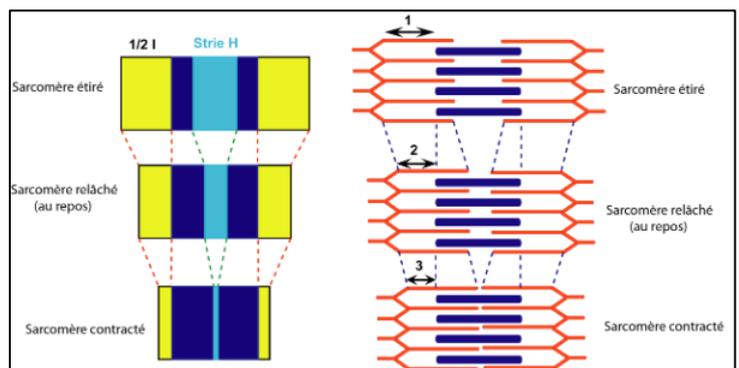
Au cours de la contraction musculaire on observe :

- Rapprochement des 2 stries Z donc un raccourcissement du sarcomère.
- Raccourcissement de la zone I (isotrope = bandes claires)
- la zone A ne change pas (les bandes sombres) mais on remarque un raccourcissement de la bande H et sa disparition parfois.

1-2 Déductions et explications

le Schéma explicatif ci-joint nous démontre les mécanismes intervenant dans la contraction au niveau du sarcomère.

Dans ce schéma la contraction consiste à un raccourcissement des sarcomères (réduction des 1/2 des disques claires (3) et rétrécissement des stries H grâce au glissement des myofilaments d'actines entre les myofilaments de myosine).



DONC : Puisque les bandes sombres ne changent pas de taille ; on peut expliquer le raccourcissement observé au niveau du sarcomère après la contraction par un glissement des filaments fins d'actine le long des filaments épais de myosine, de telle sorte que les myofilaments se chevauchent.

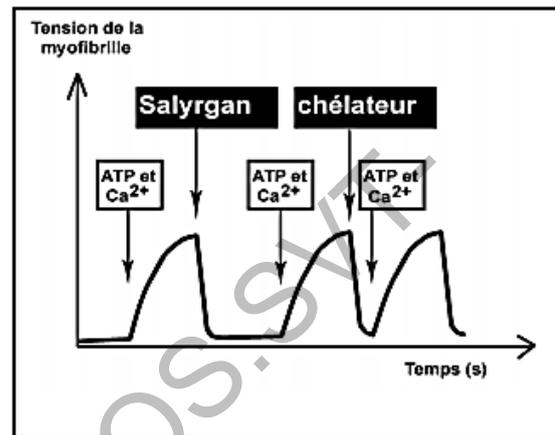
2-Mécanismes du glissement des filaments

2-1 expériences et exercice

Pour préciser le mécanisme de la contraction musculaire, on réalise les expériences suivantes :

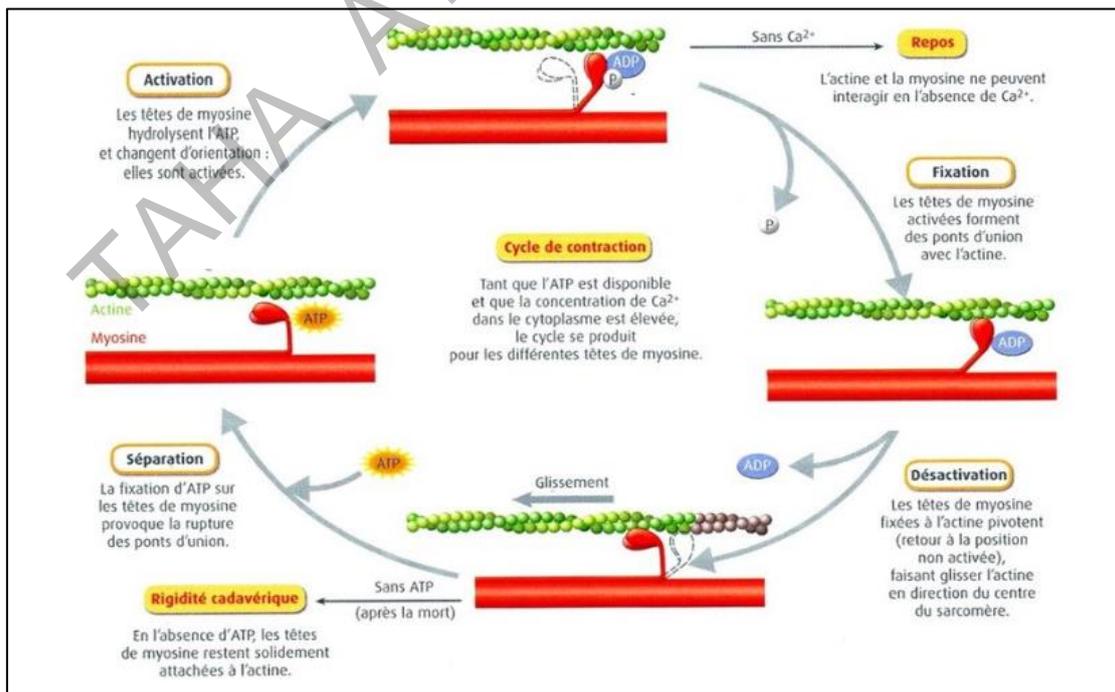
Expérience : des myofibrilles isolées et placées dans un liquide riche en ATP et en Ca^{2+} . On additionne au milieu, le salyrgan (un poison qui bloque l'hydrolyse de l'ATP) puis un chélateur (Une substance qui fixe les ions Ca^{2+} inhibant ainsi leur action) et on mesure la tension de la myofibrille. Le document ci-contre montre les résultats obtenus.

- Analysez ces résultats et déduisez les conditions nécessaires à la contraction musculaire
- Expliquez à l'aide des schémas commentés, le mécanisme de la contraction musculaire suite à l'arrivée d'un potentiel d'action.



2-2 Réponses :

a)- On observe que les myofibrilles se contractent rapidement après l'ajout de l'ATP et du Ca^{2+} , par contre après l'inhibition de l'hydrolyse de l'ATP par l'ajout du Salyrgan, il n'y a plus de contraction. Aussi, lorsqu'on annule l'effet du Ca^{2+} , on n'obtient pas de contraction malgré la présence de l'ATP.



b)- Pour fonctionner, le muscle a besoin d'énergie sous forme d'ATP et des ions Ca^{2+} , ces derniers permettent de libérer les sites de fixation de myosine sur les filaments d'actine, pour former les complexes d'actomyosine.

3-conclusions

La contraction musculaire est à la base un mécanisme de glissement des filaments d'actines sur les filaments de myosine et se déroule en 4 phases :

- Activation : L'ATP se fixe sur la tête de myosine qui n'est pas fixée à l'actine. L'ATP est hydrolysée en ADP + Pi qui restent fixés sur la tête de myosine, ce qui libère de l'énergie. Cette énergie permet le redressement de la tête de myosine.
- Fixation : En présence de calcium, la tête de myosine qui a conservé son ADP et son Pi se fixe à l'actine. En absence de calcium la fibre reste au repos.
- Désactivation : L'ADP et le Pi sont libérés, ce qui entraîne un basculement de la tête de myosine. Ce basculement entraîne le filament d'actine qui glisse entre les filaments de myosine : c'est la contraction.
- Séparation : L'ATP est nécessaire à la rupture du complexe actine/myosine (d'où la rigidité cadavérique après la mort) pour permettre un nouveau cycle.

Tant que l'ATP est disponible et la concentration de Ca^{2+} est élevée, le cycle se répète pour toutes les têtes de myosine, ce qui entraîne le glissement des filaments d'actine et de myosine. Après l'arrêt de la stimulation, les ions Ca^{2+} retournent vers le réticulum sarcoplasmique et le muscle se relâche.

Ce qui nous implique l'existence d'un mécanisme garantissant un afflux constant de l'ATP pour éviter l'arrêt brusque du processus de contraction.

 On nomme ce phénomène le renouvellement de l'ATP

V. Renouvellement de l'ATP et ses modalités :

1. Données expérimentales :

Le tableau ci-dessous présente les résultats du dosage de certains constituants dans un muscle au repos et dans le même muscle après contraction dans divers conditions expérimentales.

| Conditions expérimentales | Observations | Produits dosés | Résultats du dosage | |
|---|---|---|-------------------------|--------------------------|
| | | | Avant la contraction | Après la contraction |
| Stimulation du muscle non traité | Contraction du muscle pendant 3 minutes | Glycogène Acide lactique ATP Phosphocréatine | 1.62 1.5 2 1.5 | 1.21 1.95 2 1.5 |
| Stimulation du muscle traité avec une substance bloquant l'utilisation du glycogène. | Contraction du muscle pendant 3 minutes | Glycogène Acide lactique ATP Phosphocréatine | 1.62 1.5 2 1.5 | 1.62 1.5 2 0.4 |
| Stimulation du muscle traité avec une substance bloquant l'utilisation du glycogène et de la phosphocréatine. | Contraction du muscle puis arrêt. | Glycogène Acide lactique ATP Phosphocréatine | 1.62 1.5 2 1.5 | 1.62 1.5 0 1.5 |

Selon vos analyses de ces données , quels sont vos déductions ?

2- - Analyse et déductions :

Expérience 1 : on observe que le taux de glycogène diminue, celui de l'acide lactique a augmenté alors que le taux de l'ATP et celui de la phosphocréatine sont restés stables

Déduction : Le taux stable de l'ATP dans cette expérience, malgré la consommation d'énergie pendant la contraction, montre qu'il y a un renouvellement continu de l'ATP, et ceci grâce à la fermentation lactique : le glycogène s'hydrolyse en glucose, qui, suite à la fermentation lactique, produit de l'acide lactique et de l'ATP.

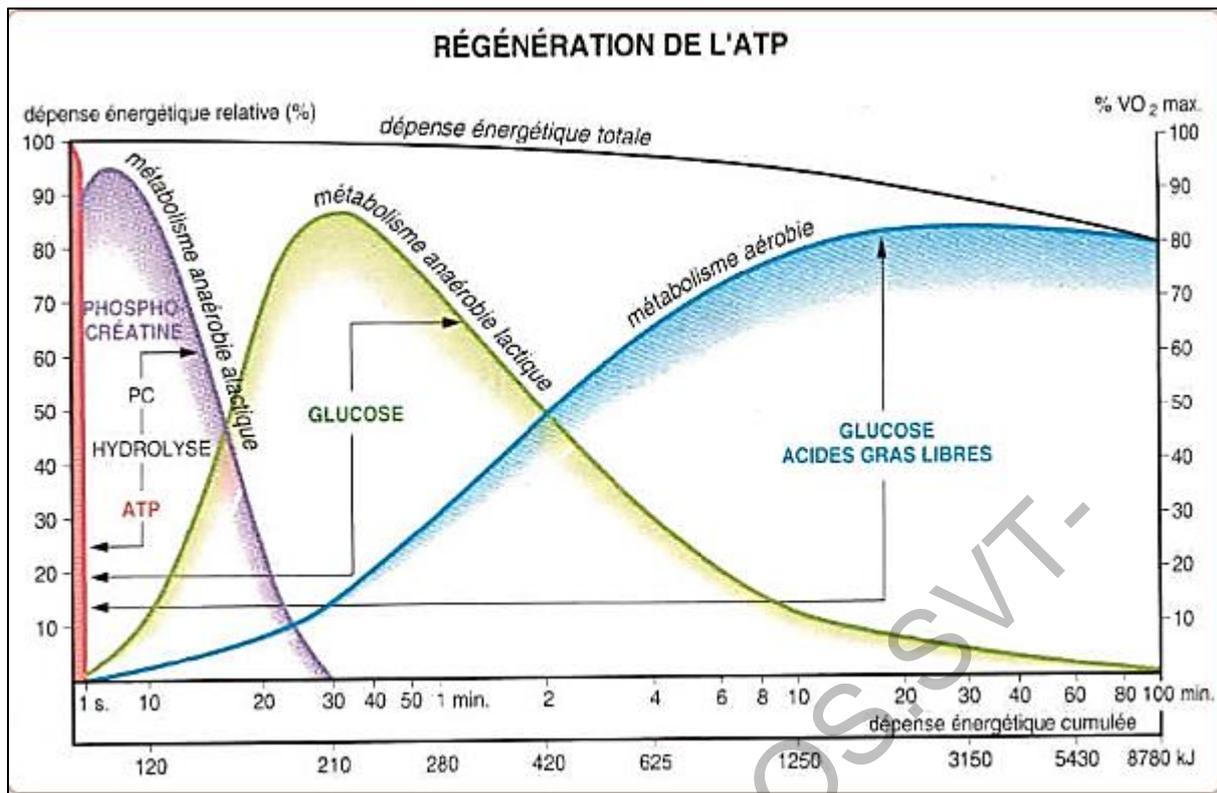
- **Expérience 2 :** on observe que le taux de la phosphocréatine diminue.

Déduction : ces résultats démontrent que le renouvellement de l'ATP dans ce cas, se fait grâce à la phosphocréatine, une substance riche en phosphate, qui renouvelle l'ATP.

Expérience 3 : le muscle a arrêté de se contracter après l'épuisement de ses réserves en ATP, donc il n'y a pas eu renouvellement d'ATP.

3- le renouvellement ou le mécanisme de régénération de l'ATP

Remarque importante : le renouvellement est une traduction directe du terme utilisé en cours SVT option langue arabe (تجديد) or le terme technique qui est couramment en français et la Régénération de l'ATP est ce processus à essentiellement trois voies métaboliques.



Selon ce graphe, il existe trois voies de régénération qui sont utilisés par le muscle strié selon le type d'effort auquel il est soumis mais surtout la durée de cet effort.

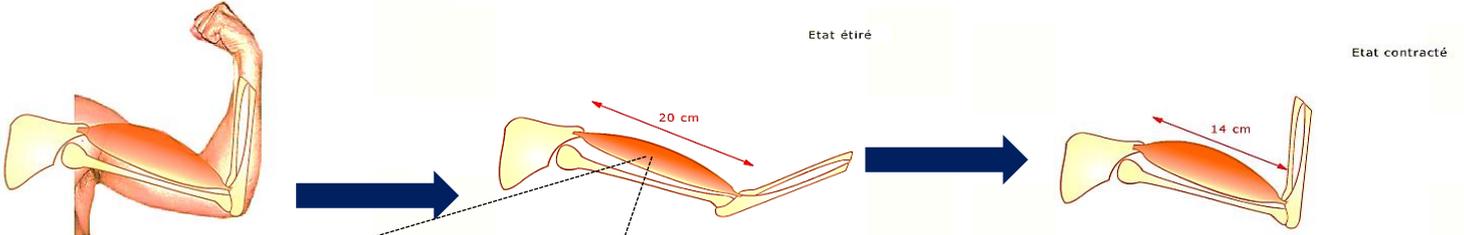
On distingue trois voies :

La voie anaérobie a lactique dite « voie rapide » régénération de l'ATP grâce à des réaction chimique qui ne nécessitent pas de l'oxygène et qui ne produisent pas l'acide lactique, essentiellement par dégradation de la phosphocréatine. Elle permet une restauration immédiate de l'ATP dans le cas des contractions très brèves, de l'ordre de quelques secondes : **activité intense et brusque ne dépassant pas 10 secondes**

La voie anaérobie lactique « moyennement rapide » régénération de l'ATP grâce la glycolyse anaérobie: réaction d'hydrolyse de glycogène en absence d'oxygène et produisant l'acide lactique. cette voie intervient pour des activités mécanique d'une durée comprise entre 10 seconde et 1 à 2 minutes.

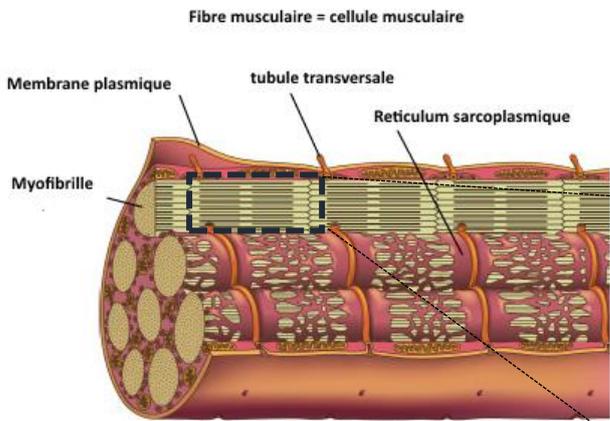
La voie aérobie « lente »: régénération de l'ATP grâce à l'oxydation des produits organiques (Glucose et lipides) si l'activité mécanique dépasse une durée de 1 à 2 minutes

BILAN

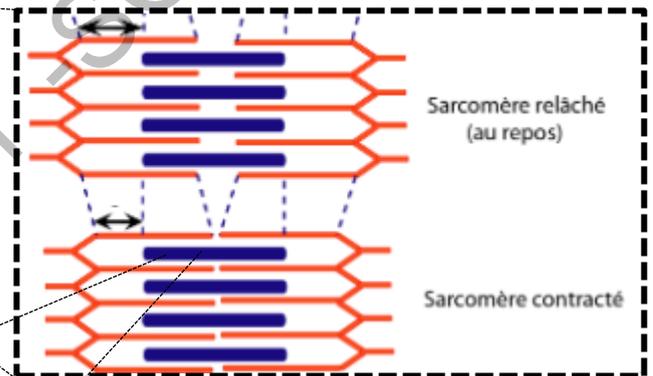


Le muscle squelettique strié effectue ces mouvements sous forme de contraction-relâchement, c'est-à-dire que suite à une excitation le volume du muscle diminue ou se contracte, puis il retourne à ses dimensions d'origine : c'est le relâchement.

Donc le muscle est caractérisé par sa **contractilité** et son **excitabilité**



la cellule musculaire a une forme longitudinale, on la nomme **fibre musculaire**, elle contient des myofibrilles qui contiennent 2 types de myofilaments : l'actine et la myosine



Le **sarcomère** est l'unité structurale et fonctionnelle de la fibre musculaire, il est responsable de la contraction musculaire qu'il effectue par glissement des filaments d'actine sur les filaments de myosine

| REPOS | CONTRACTION | RELACHEMENT |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Myofilaments d'actine et de myosine sont détachés Sites de fixation sont masqués par une protéine La tête de myosine fixe une molécule d'ATP | <ul style="list-style-type: none"> Arrivée d'un PAM Sortie des ions calcium du reticulum sarcoplasmique Masquage des sites de fixation Attachement actine et myosine | <ul style="list-style-type: none"> Hydrolyse de l'ATP Pivotement des têtes de myosine 1 Glissement d'actine entre les myofilaments de myosine 2 |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Retour des ions calcium vers les citernes de reticulum sarcoplasmiques Détachement d'actine et de myosine Redressement des têtes de myosine et fixation des nouvelles molécules d'ATP 3 Retour d'actine à la position initiale et masquage des sites de fixation 4 |