

LECON N°7 : L'ACTIVITE DU MUSCLE STRIE SQUELETTIQUE**INTRODUCTION**

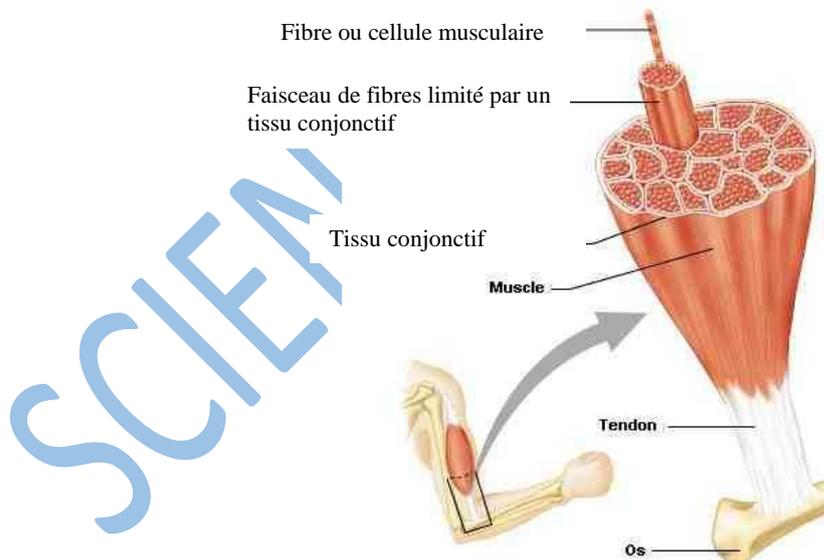
Chez l'homme, les muscles occupent entre 45 et 50% de la masse corporelle totale. Il existe trois types de muscles :

- les muscles squelettiques striés rattachés aux os, permettant les mouvements et qui sont sous le contrôle du système nerveux central.
- les muscles lisses et le muscle cardiaque qui sont sous le contrôle du système nerveux végétatif (orthosympathique ou parasympathique).

Leur mode fonctionnement est le même et consiste à transformer l'effet d'une stimulation en une contraction, c'est à dire transformer une énergie chimique en une énergie mécanique.

**I- STRUCTURE DES MUSCLES SQUELETTIQUES :****I-1. Structure macroscopique du muscle :**

A l'œil nu le muscle présente un ventre terminé par des tendons. En coupe transversale on voit un tissu conjonctif entourant des lots de fibres musculaires ou cellules musculaires, des vaisseaux sanguins et des nerfs.



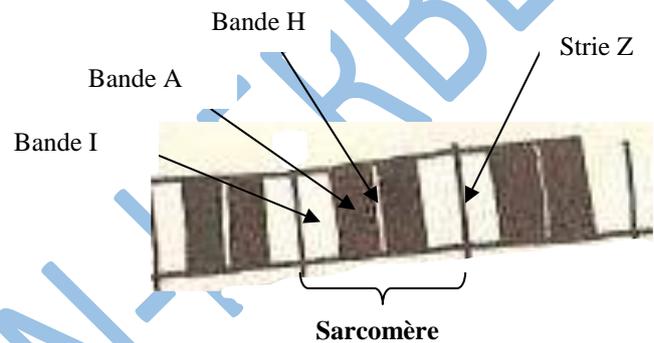
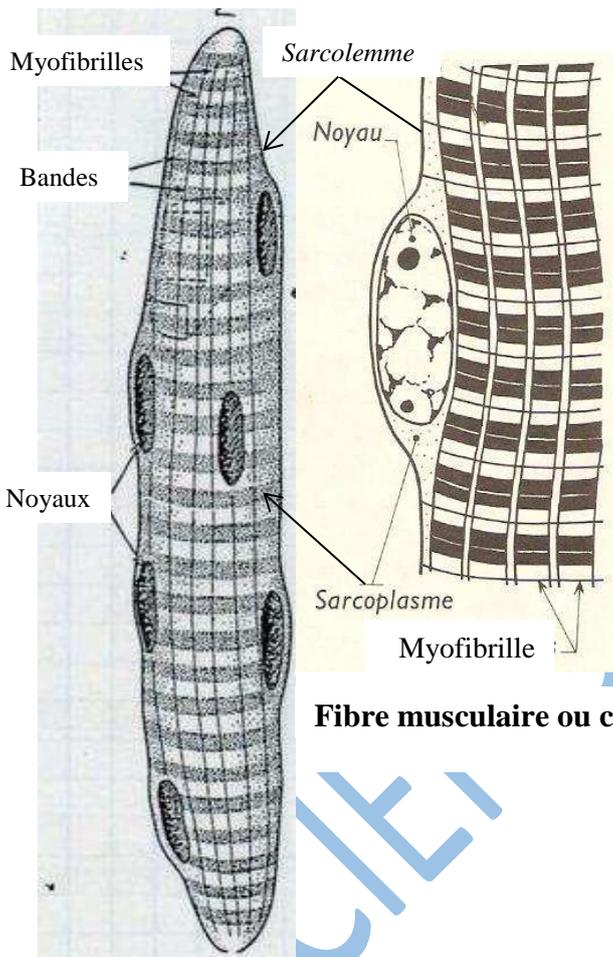
**Structure macroscopique du muscle**

## I-2. Structure microscopique :

### I-2-1. Observation au microscope optique :

Au microscope optique la fibre musculaire est une cellule géante (4 à 5 cm de long) plurinucléée (syncytium) limitée par une membrane plasmique appelée, le **sarcolemme**, qui délimite un cytoplasme appelé **sarcoplasme**. Le sarcoplasme est parcouru par de fins filaments appelés **myofibrilles** constituées d'une alternance régulière de bandes claires et sombres situées au même niveau d'une myofibrille à l'autre.

Les bandes claires appelées **bande I** (bande isotrope) présentent à leur milieu un trait fin, la **strie Z**. Les bandes sombres ou **bandes A** (bandes anisotropes) contiennent au milieu une bande claire, la **bande H**. Deux **striés Z** successives d'une myofibrille délimitent une unité appelée **sarcomère**, formée d'une bande sombre encadrée de deux demi-bandes claires.



Portion d'une myofibrille au Microscope optique

Fibre musculaire ou cellule musculaire

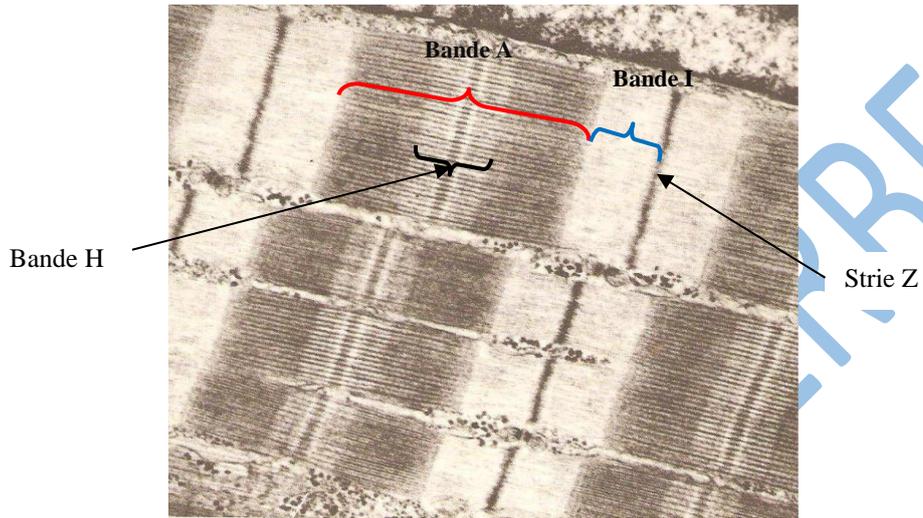
### I-2-2. Observation au microscope électronique :

Au microscope électronique chaque myofibrille apparaît formée de deux types de filaments de nature protéiques :

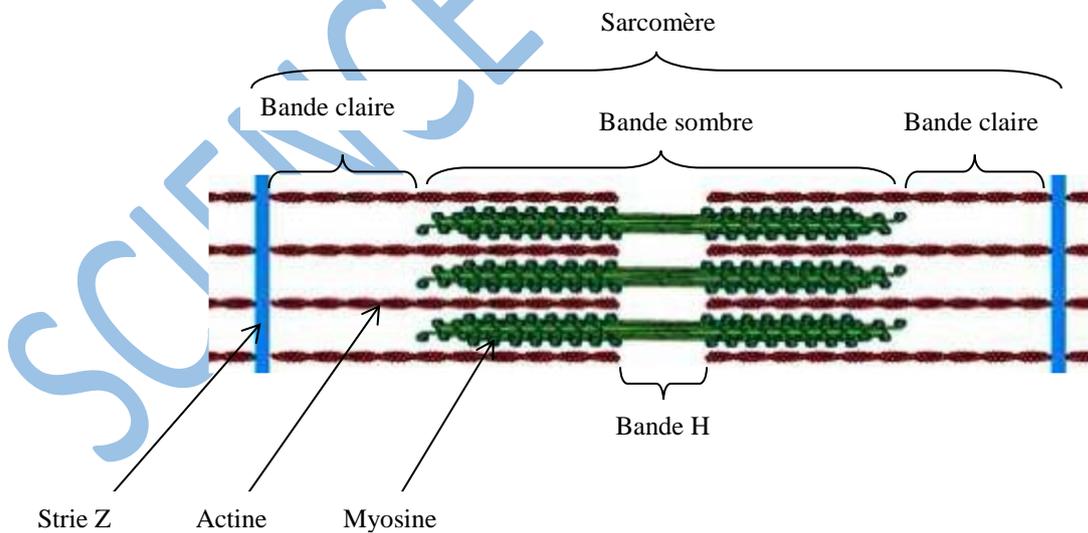
- Des filaments fins de **50 Å** de diamètre constitués d'**actine**.
- Des filaments épais de **160 Å** de diamètre constitués de **myosine**.

Les **bandes claires** sont constituées uniquement de filaments d'actine qui se fixent à la **strie Z**, les **bandes sombres** sont constituées de filaments d'actine et de myosine et les **bandes H** n'ont que des filaments de myosine.

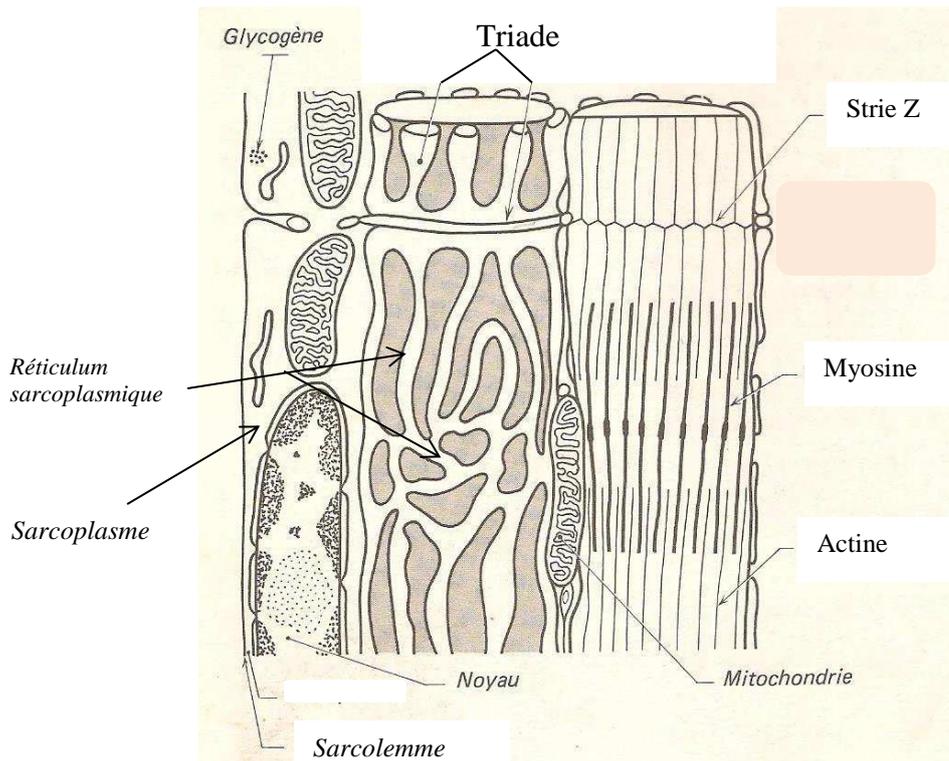
En plus de ses éléments caractéristiques, la fibre musculaire contient un réticulum sarcoplasmique très abondant accumulant des ions  $\text{Ca}^{2+}$ , de nombreuses mitochondries, du glycogène et toutes les caractéristiques de la cellule animale.



**Myofibrille au microscope électronique**



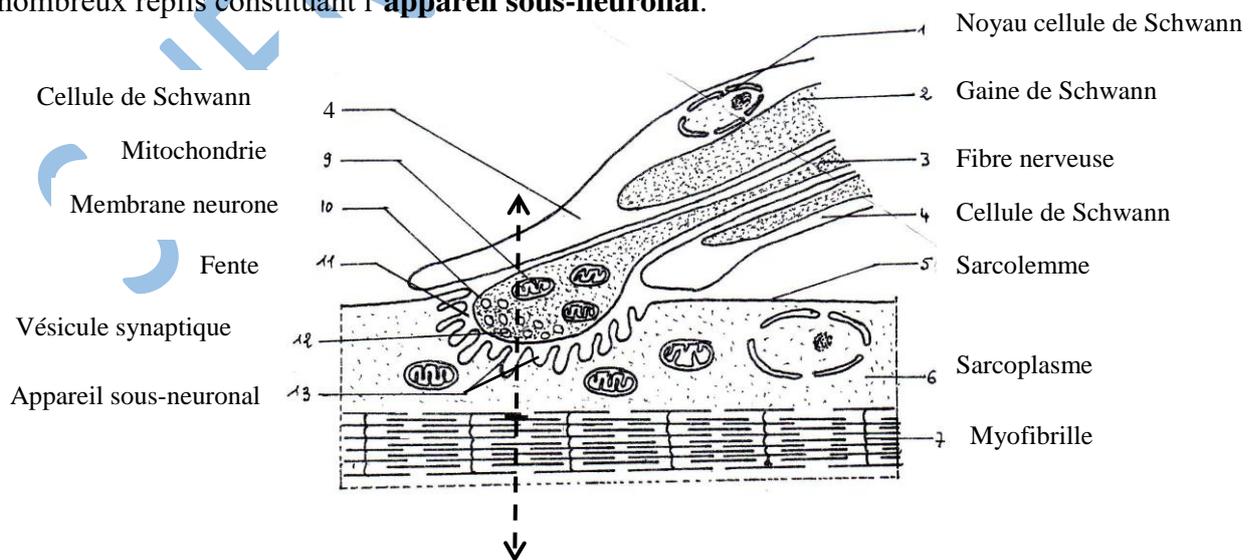
**Schéma d'un sarcomère**



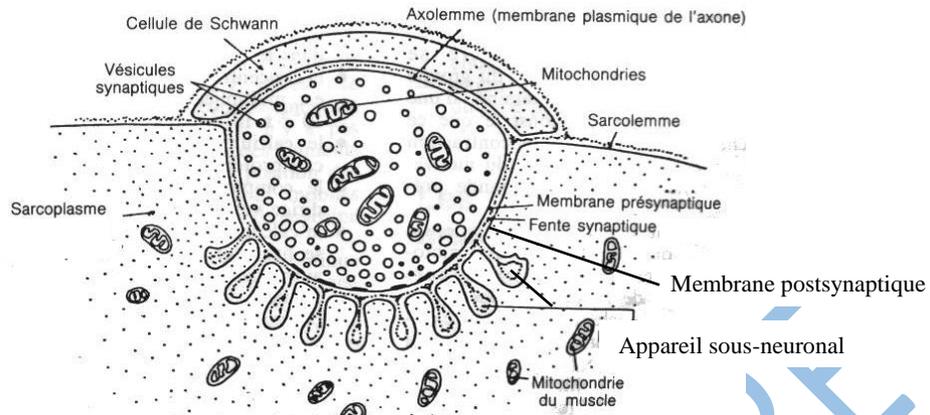
**Schéma d'une fibre musculaire au microscope électronique**

**I-3. Notion d'unité motrice :**

Une fibre nerveuse (neurone) innerve plusieurs fibres musculaires. On appelle **unité motrice** l'ensemble neurone et les fibres musculaires qu'il innerve. La jonction entre une fibre nerveuse et une fibre musculaire est appelée **jonction neuromusculaire** ou **plaque motrice**. Au microscope électronique le contact entre la fibre nerveuse et la fibre musculaire présente de nombreux replis constituant l'**appareil sous-neuronal**.



**Schéma de la plaque motrice au microscope électronique**



**Schéma coupe transversale de la plaque motrice**

#### **I-4. Commande nerveuse**

L'arrivée de l'influx nerveux conduit par le nerf au niveau de la plaque motrice entraîne une libération d'**acétylcholine** qui traverse la fente synaptique pour se fixer sur des récepteurs spécifiques du **sarcolemme**. Il se produit une forte entrée de  $\text{Na}^+$  provoquant une dépolarisation, point de départ d'un potentiel d'action, le potentiel d'action musculaire (PAM) qui se propage le long des fibres musculaires innervées, entraînant leur contraction.

Le nombre de fibres musculaires qui se contracte dépend du nombre de neurones qui transporte l'influx nerveux. L'augmentation progressive de l'amplitude de la secousse musculaire est due à un recrutement progressif des unités motrices. La contraction maximale correspond à un recrutement de toutes les unités motrices.

Comme la fibre nerveuse, la fibre musculaire répond à la **loi du tout ou rien**, alors que le muscle répond au **phénomène de recrutement**.

### **II- DIVERS PHENOMENES LIES A L'ACTIVITE MUSCULAIRE :**

Plusieurs phénomènes interviennent lors de l'activité musculaire, ce sont les phénomènes mécanique, électrique, thermique et chimique.

#### **II-1. Phénomènes mécaniques :**

##### **II-1-1. Etude expérimentale de la contraction :**

##### **II-1-1-1. Matériel (fig. 1) :**

Le matériel est constitué du matériel biologique, du dispositif d'excitation et du dispositif d'enregistrement.

##### ✓ **Matériel biologique (grenouille)**

L'animal à utiliser lors de l'expérience doit subir :

- Une destruction de l'encéphale (décérébré) et de la moelle épinière (démédulé) ;
- Une dissection du muscle au niveau du tendon rattaché au pied. Le nerf sciatique de la cuisse est placé sur des électrodes stimulatrices.

##### ✓ **Dispositif excitateur**

Le dispositif excitateur est constitué :

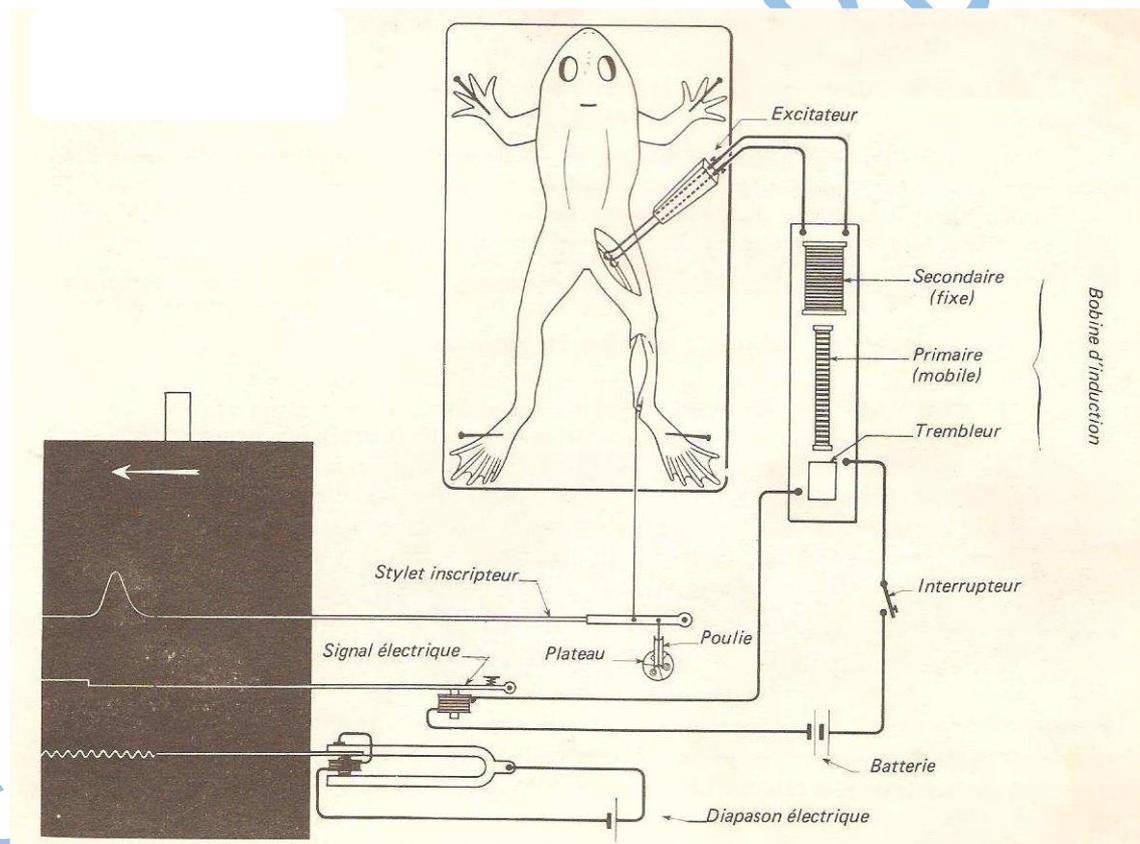
- D'un générateur de courant (2 piles de 4,5 V chacune).

- D'un chariot inducteur composé de 2 bobines électriques : le primaire et le secondaire, d'un interrupteur dont la fermeture et l'ouverture produisent des excitations, d'un trembleur qui fait varier la fréquence des excitations.
- D'un excitateur (les électrodes excitatrices) montées sur le nerf.

✓ **Dispositif d'enregistrement**

Il est constitué :

- D'un stylet inscripteur relié par un fil au muscle et qui trace les mouvements du muscle ;
- D'un cylindre enregistreur rotatif recouvert d'une feuille de papier noircie à la fumée, la pointe du stylet inscripteur s'y frotte et y laisse une marque blanche, le myogramme ;
- D'un signal d'excitation enregistrant le moment précis de l'excitation ;
- D'un chronographe donnant la durée des phénomènes (enregistre sur une base de temps de 1/100<sup>e</sup> de seconde)

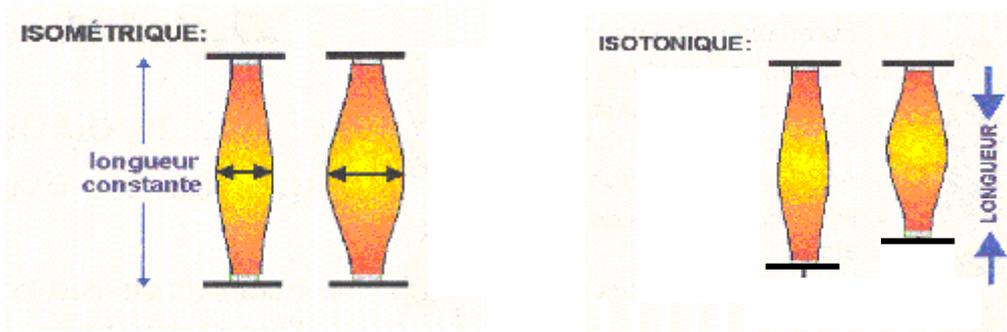


**Dispositif d'enregistrement d'un myogramme**

**II-1-1-2. Etude d'une contraction musculaire :**

Le muscle présente plusieurs aspects en se contractant :

- il se raccourcit et la force développée est constante, c'est une **contraction isotonique**.
- il conserve sa longueur et la force développée croit progressivement, c'est une **contraction isométrique**, qui se produit lorsqu'on fournit un effort croissant mais infructueux pour soulever un objet lourd.
- Par ailleurs nos muscles sont toujours en état de légère contraction isométrique, c'est le **tonus musculaire** maintenu par les voies réflexes.



### II-1-1-3. Etude expérimentale de la contraction musculaire :

#### ✓ **Seuil d'excitation**

Excitons le nerf rattaché au muscle en augmentant l'intensité de stimulation. A une certaine intensité le muscle réagit. Donc le muscle n'est excitable qu'à partir d'une intensité seuil, la **rhéobase**.

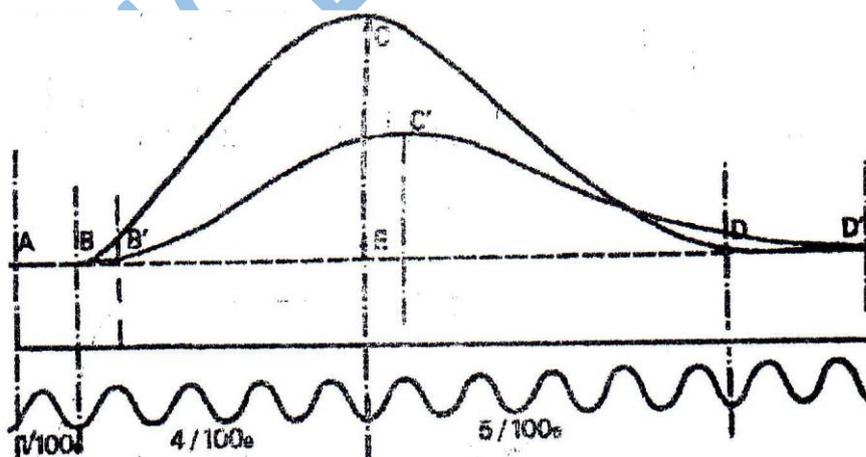
#### ✓ **Réponse à une excitation unique**

Une excitation liminaire produit une secousse musculaire élémentaire (A, B, C, D) que l'on décompose en 3 phases :

- **Temps de latence AB** qui est le temps mit par le muscle pour répondre à l'excitation.
- **Phase de contraction BC** au cours de laquelle la longueur du muscle diminue et sa tension augmente.
- **Phase de relâchement CD** au cours de laquelle le muscle reprend sa dimension initiale et sa tension baisse.

L'augmentation de l'intensité de stimulation entraîne une augmentation de l'amplitude de la secousse musculaire qui atteint un maximum aux fortes intensités.

En prolongeant les stimulations, on obtient une fatigue musculaire dont la secousse a une amplitude faible et un temps de relâchement plus long (A', B', C', D').

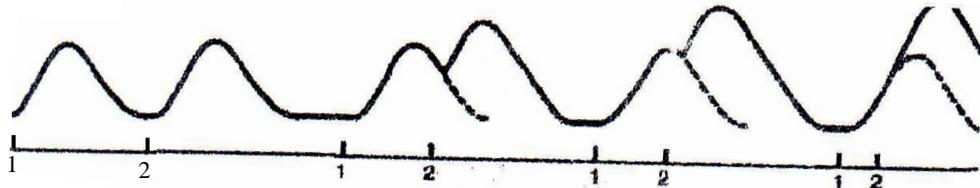


**Secousse musculaire élémentaire**

#### ✓ **Réponse à plusieurs excitations d'intensité égale**

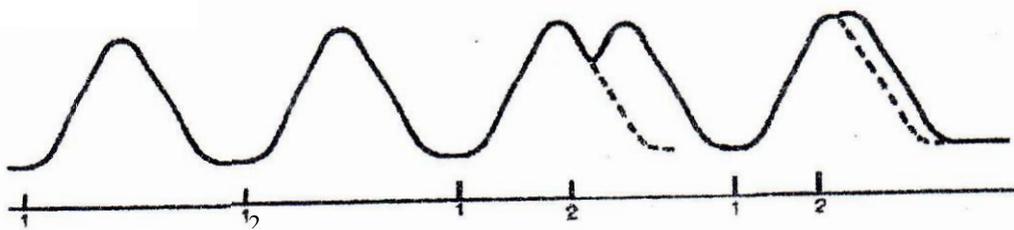
- ★ Excitons le nerf avec deux excitations liminaires d'intensités égales :

- Si la deuxième stimulation intervient après la phase de décontraction de la première, on obtient une deuxième contraction ou secousse identique isolée à la première.
- Si la deuxième stimulation intervient au moment de la phase de relâchement de la première, on obtient une seconde contraction d'amplitude plus grande avec une fusion incomplète, c'est la **sommation partielle**.
- Si la deuxième stimulation intervient au moment de la phase de contraction de la première, on obtient une secousse d'amplitude supérieure à celle d'une secousse isolée, on a une fusion complète, c'est une **sommation totale**.



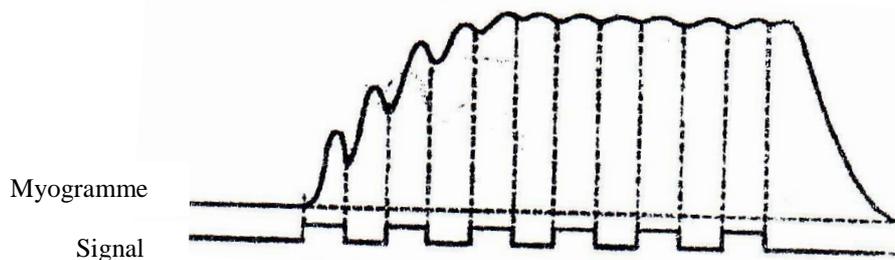
### Réponse à plusieurs excitations d'intensités égales

- ★ Excitons le nerf avec deux excitations suffisantes pour provoquer une contraction maximale, on obtient selon le moment où arrive le second stimulus :
  - Soit deux secousses séparées de même amplitude maximale,
  - Soit deux secousses de même amplitude incomplètement fusionnées,
  - Soit une portion plane.



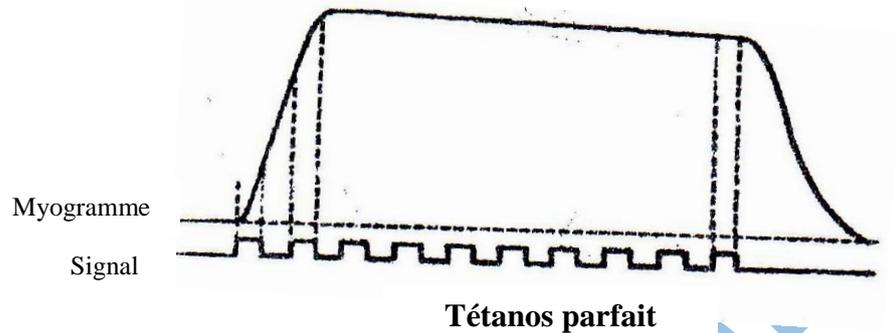
### Réponse à plusieurs excitations d'intensités suffisantes provoquant une contraction maximale

- ★ Excitons le nerf avec une série de stimulations identiques. On obtient :
  - Avec une fréquence d'excitation faible (15 chocs/s), on obtient des secousses d'amplitudes croissantes avant d'atteindre un maximum en forme de plateau sinueux, c'est le **tétanos imparfait**.



### Tétanos imparfait

- Avec une fréquence d'excitation plus élevée (30 chocs/s), on obtient un plateau à allure rectiligne, c'est le **tétanos parfait**. Il y a contraction sans relâchement.



- Avec une fréquence encore plus élevée (1 million de chocs/s), on a une secousse simple pas suivie d'autres secousses, car chaque contraction est suivie d'une **période réfractaire** très courte pendant laquelle le muscle est inexcitable.

### II-1-2. Mécanisme de la contraction :

#### ➤ **Organisation des myofilaments**

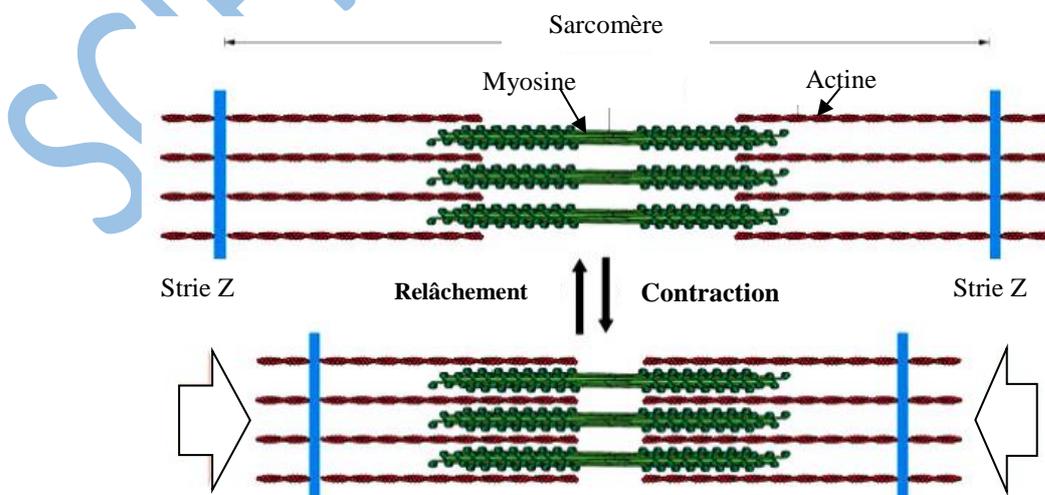
Les filaments d'**actine** sont issus d'une polymérisation d'**actines globulaires**, associées à deux protéines : la **troponine** et la **tropomyosine**.

Les filaments de **myosine** sont constitués de 4 chaînes protéiques qui leur donnent la forme de bâtonnet terminé avec des **têtes globuleuses**.

#### ➤ **Observations**

Pendant la contraction, les myofilaments, les sarcomères, les bandes claires et la bande H se raccourcissent, mais la bande sombre, les filaments d'actine et de myosine conservent leur longueur.

Donc lors de la contraction il se produit un glissement des filaments d'actines par rapport aux filaments de myosine entraînant un raccourcissement des sarcomères, des myofibrilles, des fibres musculaires donc du muscle.



**Variation de longueur du sarcomère lors de la contraction du muscle**

### II-1-3. Interprétation de la contraction :

Le glissement entre les filaments d'actine et de myosine est dû à l'existence de liaisons entre ces filaments. Il se fait en trois étapes :

- **Repos (A)**

Au repos, la **tropomyosine** cache le site d'attache entre actine et myosine.

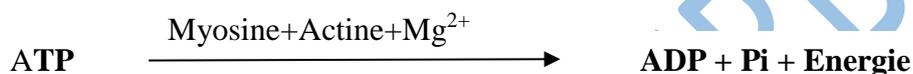
- **Attachement (B)**

L'excitation de la fibre musculaire par l'influx nerveux provoque la libération d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  accumulés dans le **réticulum sarcoplasmique**. Ces ions se fixent sur la **troponine** qui en se déformant repousse la **tropomyosine** et libère le site d'attache actine et myosine.

En même temps les mitochondries produisent de l'ATP (adénosine triphosphate) qui se fixe sur les têtes de myosine qui se détachent et s'attachent à l'actine au niveau des sites de fixation.

- **Glissement (C)**

La myosine activée par l'actine devient une enzyme ATPase qui hydrolyse l'ATP en présence d'ions  $\text{Mg}^{2+}$ .

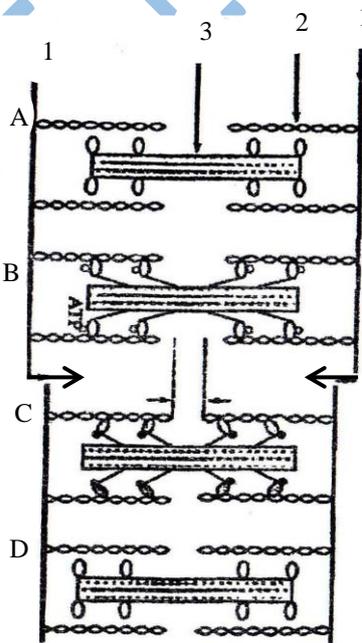


- **Détachement (D)**

Le retour à l'état initial se fait par un détachement de l'actine et de la myosine grâce à deux phénomènes simultanés :

- L'absorption active des ions  $\text{Ca}^{2+}$  par le réticulum sarcoplasmique.
- La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur les têtes de myosine.

Le retour à l'état initial est un phénomène passif dû à la contraction du muscle antagoniste.



### II-2. Phénomènes électriques :

#### II-2-1. Potentiel de repos :

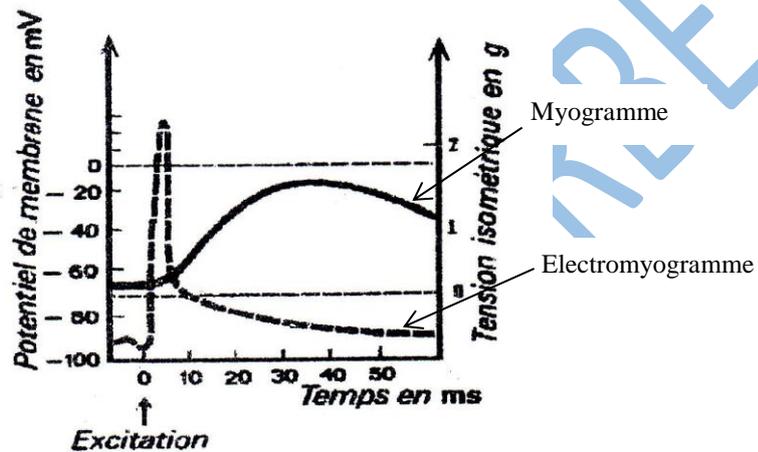
Plaçons une électrode à la surface et l'autre à l'intérieur du muscle, on note une déviation de l'aiguille, donc il y a une différence de potentiel (ddp) entre la surface et l'intérieur du muscle

au repos, c'est le potentiel de repos du muscle. L'existence de ce potentiel de repos est à l'origine de son excitabilité.

### II-2-2. Potentiel d'action musculaire :

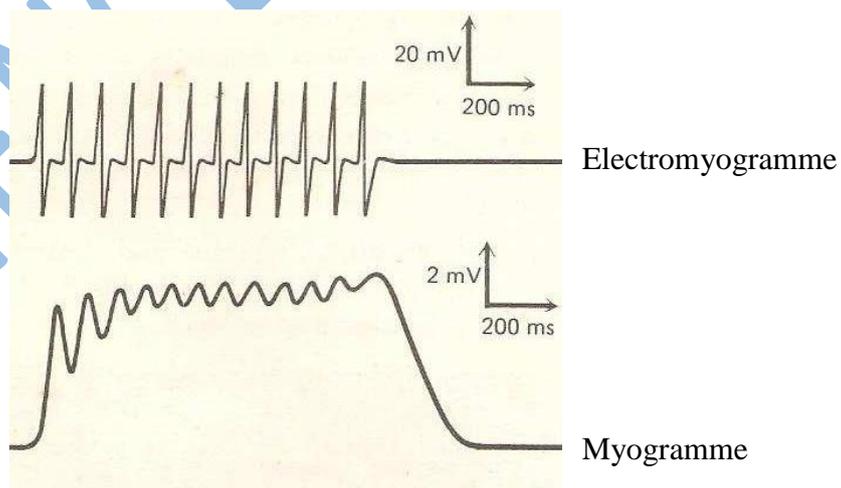
Relions des électrodes réceptrices à un oscilloscope, l'une à l'intérieur l'autre à l'extérieur du muscle. A l'aide d'électrodes stimulatrices, stimulons le muscle. On obtient un **électromyogramme** sur lequel on note un **artéfact de stimulation** et un **potentiel d'action** de **80 à 100 mV** d'amplitude.

Un enregistrement simultané des phénomènes électriques et mécaniques montre que l'électromyogramme s'accomplit entièrement pendant la phase de latence du **myogramme**.

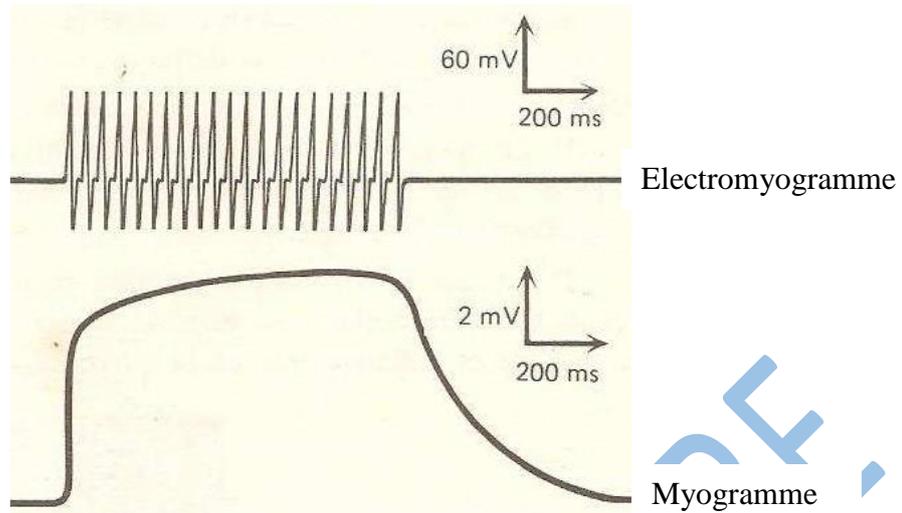


Superposition électromyogramme-myogramme

**Remarque :** Dans le cas d'un tétanos, chaque secousse élémentaire est précédée d'un potentiel d'action distinct. Les potentiels d'action ne fusionnent donc jamais.



Superposition électromyogramme-myogramme d'un tétanos parfait



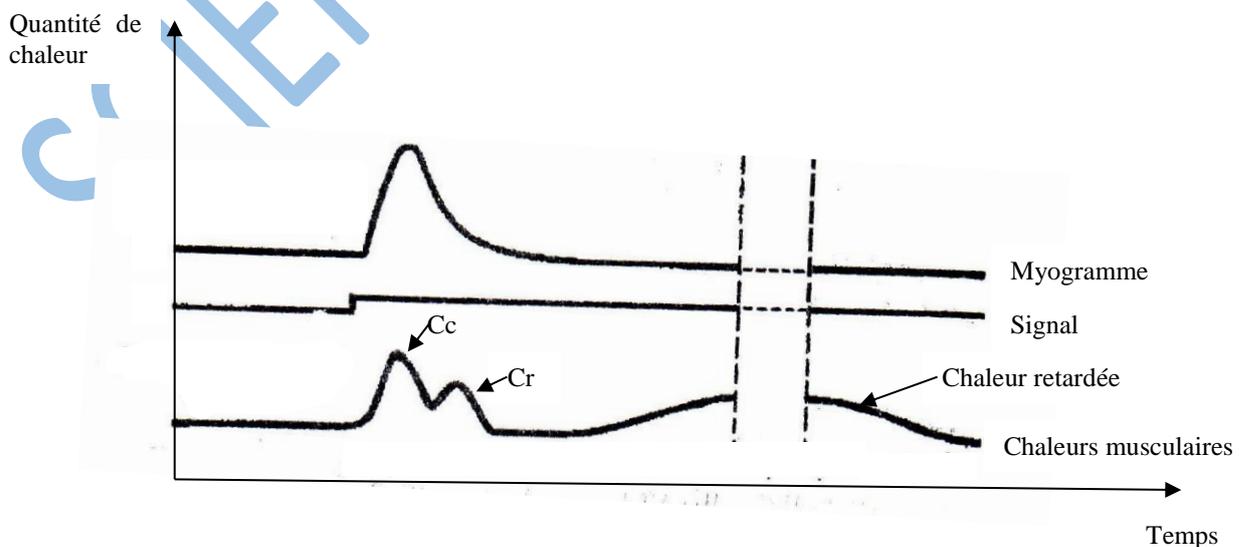
Superposition électromyogramme-myogramme d'un tétanos parfait

### II-3. Phénomènes thermiques :

La contraction du muscle s'accompagne d'une production de chaleur d'amplitude et de durée très faible. Elle peut être enregistrée grâce à des aiguilles thermiques très sensibles (composées de cuivre et de nickel), capables d'apprécier des variations thermiques de quelques microdegrés ( $\mu\text{m}$ ).

La chaleur dégagée par le muscle lors de sa contraction, entraîne une différence de température entre les aiguilles qui se traduit par la production d'un courant électrique d'intensité proportionnelle à la température produite. Cette chaleur se décompose en :

- **chaleur initiale** constituée d'une **chaleur de contraction (Cc)** produite pendant la contraction et une **chaleur de maintien (Cm)**, de **soutien (Cs)** ou de **relâchement (Cr)** se produisant pendant le relâchement.
- **chaleur retardée** de faible amplitude et de longue durée est produite après l'activité musculaire.



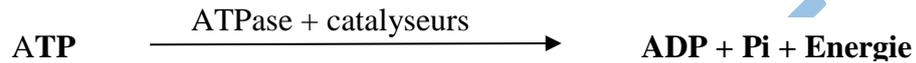
Chaleur produite par un muscle en fonction du temps

## II-4. Phénomènes chimiques :

Ce sont des phénomènes liés à consommation et à la production d'ATP (énergie) lors de la contraction musculaire.

### II-4-1. Sources énergétiques du muscle :

La contraction du muscle nécessite de l'énergie issue de l'hydrolyse de l'ATP (réaction anaérobie) directement disponible dans le muscle, grâce à l'ATPase et aux catalyseurs (complexe myosine-actine,  $Mg^{2+}$ ). Une partie de l'énergie sera perdue sous forme de chaleur initiale de contraction.



### II-4-2. Régénération de l'ATP :

Pour que la contraction se fasse pendant un certain temps, l'ATP doit être régénérée. La régénération se fait suivant deux voies :

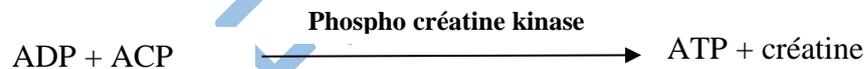
#### ➤ **La voie rapide**

Elle se fait soit :

- A partir de deux **ADP** (adénosine diphosphate) pour donner de l'ATP et de l'AMP (adénosine monophosphate), grâce à la **myokinase** (enzyme) :



- A partir de l'ADP et du **phosphagène** encore appelé **phosphocréatine** ou **acide créatine phosphorique (ACP)** :



Ces réactions s'accompagnent d'une légère perte de chaleur correspondant à la chaleur de relâchement.

**NB** : Le phosphagène constitue la véritable réserve énergétique du muscle où il est accumulé en grande quantité.

#### ➤ **Voie lente**

Le phosphagène utilisé doit être reconstitué. L'oxydation du **glucose** d'origine sanguine ou provenant de l'hydrolyse du **glycogène** musculaire ou hépatique produit de l'énergie dont une partie est mobilisée sous forme d'ATP et servira à la reconstitution du phosphagène et l'autre partie sera perdue sous forme de chaleur.

Cependant, la production d'énergie par l'oxydation du glucose se fait soit :

- **En aérobie** : lorsque la quantité d'oxygène est suffisante comme lors d'un effort musculaire moyen, la dégradation du glucose est complète avec beaucoup d'ATP produit, c'est la **voie respiratoire**.



- **En anaérobie** : Lorsque la quantité d'oxygène est insuffisante comme lors d'un effort musculaire intense, la dégradation du glucose est incomplète avec une libération d'acide lactique et peu d'ATP produit, c'est la **fermentation**.



L'accumulation d'acide lactique dans le muscle entraîne une fatigue musculaire. D'où la nécessité de l'éliminer par oxydation du 1/5 pour donner de l'ATP ou transformation du 4/5 en **glycogène** stocké dans le foie.

### II-4-3. Bilan :

Le muscle aura perdu peu de glycogène qui lui sera restitué par l'alimentation (glucose, acides gras...). L'énergie chimique libérée est transformée partiellement (contraction isotonique) ou entièrement (contraction isométrique) en chaleur.

