

## Le muscle squelettique et la transformation de l'énergie

La cellule musculaire produit et consomme une très grande quantité d'ATP pour assurer sa fonction de contraction :

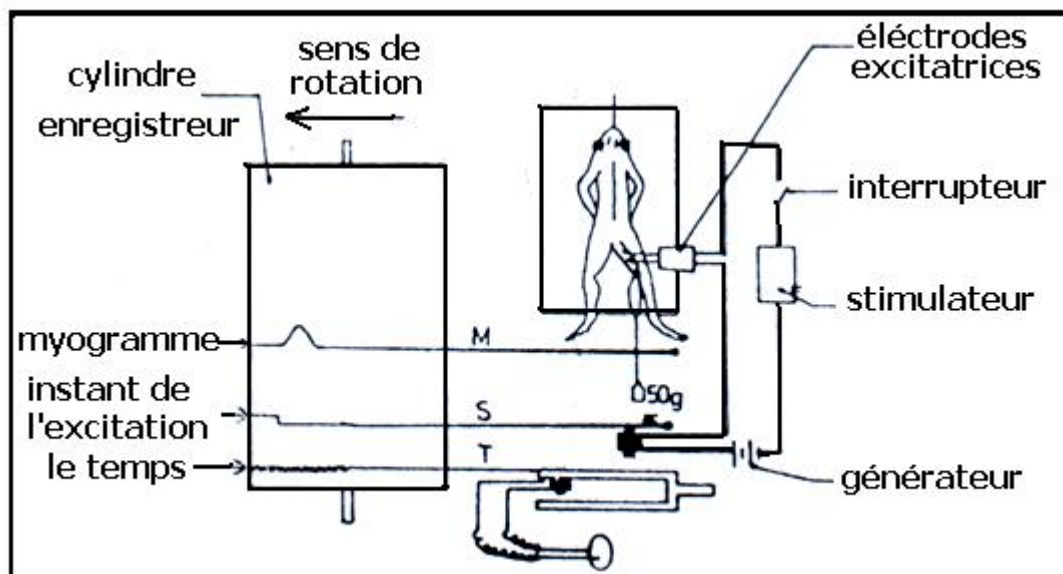
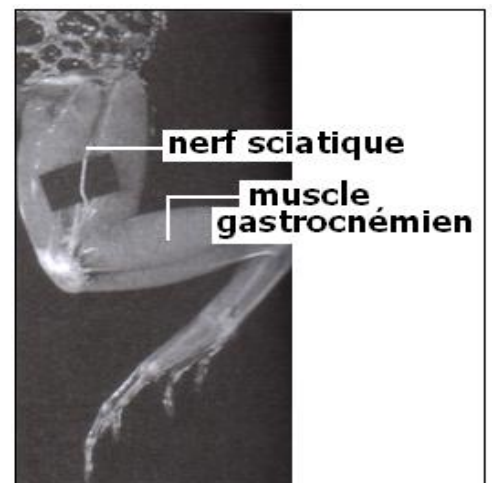
- Quels sont les manifestations de la contraction musculaire ?
- Quels sont les sources de production et du renouvellement de l'ATP dans la cellule musculaire ?
- Quelles sont les structures responsables de la contraction ?
- Quel est le mécanisme de la contraction et de la transformation de l'énergie ?

### 1- enregistrement des contractions musculaires :

Le muscle est excitable , il répond à l'excitation directe ou de son nerf par sa contraction , le muscle est excitable et contractile.

#### a- Expérience :

Pour étudier et enregistrer les contractions musculaires , on isole le muscle gastrocnémien et le nerf sciatique d'une grenouille décérébrée et déméduillée , et on utilise un montage expérimentale appelé myographe :



Le stimulateur permet de régler l'intensité et la fréquence des excitations

Le stylet M permet d'enregistrer sur le cylindre la réponse du muscle à l'excitation sous forme de myogramme

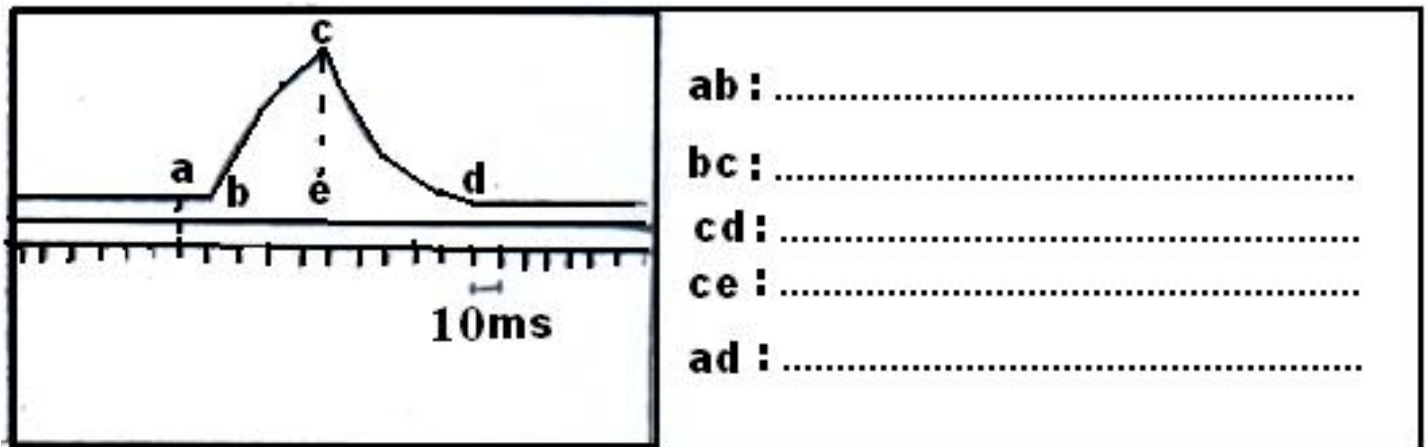
Le style S permet d'enregistrer l'instant de l'application de l'excitation

Le stylet T permet d'enregistrer le temps

### b- Résultats :

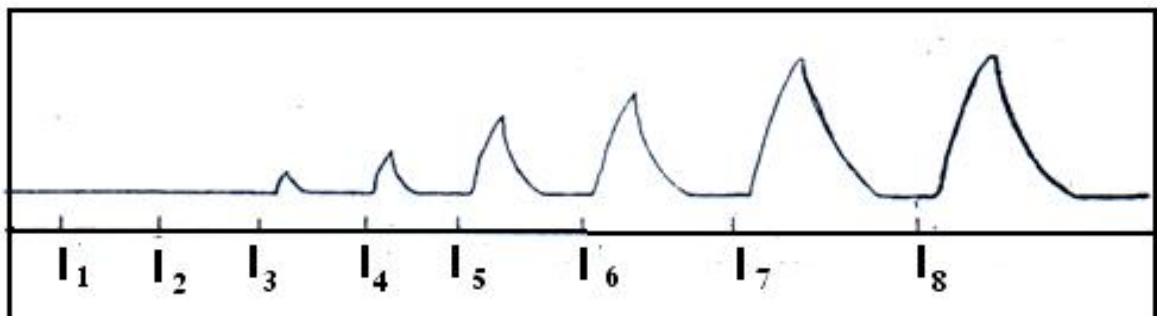
✓ Effet d'une seule excitation efficace :

On enregistre un myogramme appelé secousse musculaire :



La secousse musculaire est asymétrique la durée de la phase de contraction est plus courte que la durée de la phase du relâchement .

✓ Effet d'excitations à intensité ascendantes :



Le muscle ne répond pas aux excitations I<sub>1</sub> et I<sub>2</sub> , ce sont des excitations inefficaces I<sub>3</sub> est la plus basse intensité à laquelle le muscle répond , on l'appelle seuil d'excitation

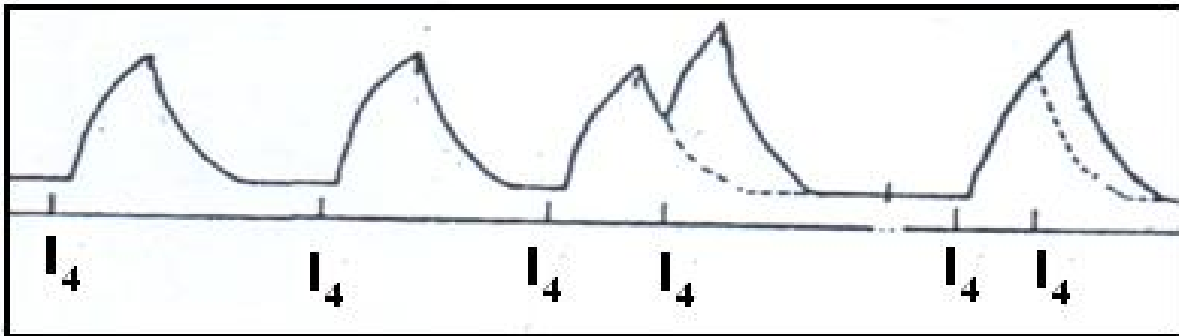
De I<sub>3</sub> à I<sub>7</sub> l'amplitude de la contraction augmente progressivement avec l'augmentation de l'intensité de l'excitation, pour atteindre une valeur maximale avec I<sub>7</sub> .

Ce phénomène s'appelle la loi de recrutement, il est due à la structure du muscle qui est formé de plusieurs cellules musculaires ou myofibrilles , plus l'intensité de

l'excitation augmente plus le nombre de myofibrilles excitées est grand et plus l'amplitude de la contraction est importante .

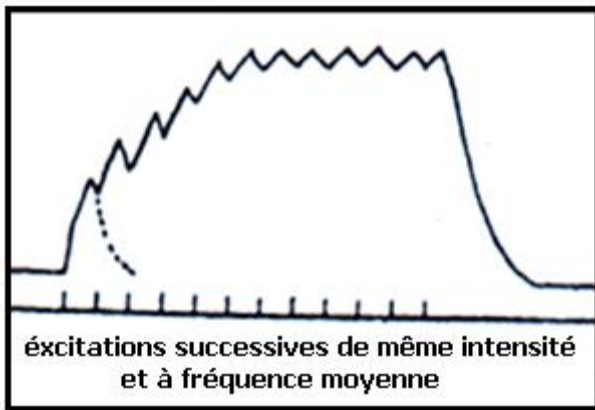
Après  $I_7$  même si l'intensité de l'excitation augmente l'amplitude de la contraction reste constante dans la valeur maximale , toutes les myofibrilles du muscle sont excitées .

- ✓ Effet de deux excitations simultanées de même intensité séparées par un temps croissant :



- Quand la deuxième excitation est appliquée longtemps après la première , on enregistre deux secousses musculaires indépendantes de même amplitude .
- Quand la deuxième excitation est appliquée pendant la phase de relâchement de la première secousse , les deux secousses musculaires interfèrent partiellement , et la deuxième a une amplitude de contraction plus élevée que la première , on parle de fusion partielle de secousses musculaires , l'élévation de l'amplitude de contraction de la deuxième secousse est due à la loi de sommation : l'effet de la deuxième excitation s'ajoute à l'effet de la première .
- Quand la deuxième excitation est appliquée pendant la phase de contraction de la première secousse, les deux secousses musculaires interfèrent totalement, et on enregistre une seule secousse de grande amplitude de contraction, on parle de fusion totale des secousses musculaires, l'élévation de l'amplitude est due à la loi de sommation.

- ✓ Effet de plusieurs excitations successives de même intensité :



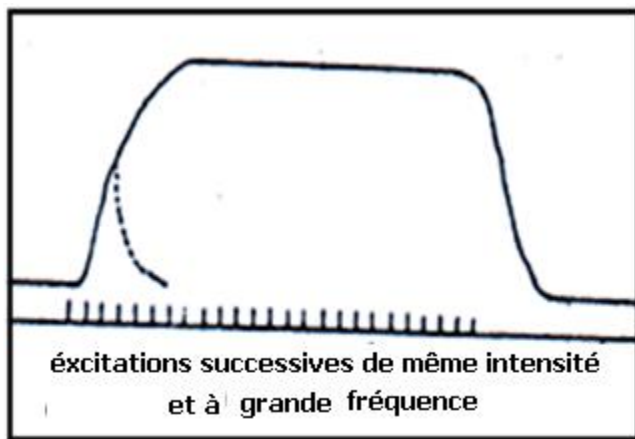
A fréquence moyenne chaque excitation est appliquée pendant la phase de relâchement de la secousse précédente :

Au début on enregistre une fusion partielle des secousses avec augmentation progressive de l'amplitude de contraction jusqu'à atteindre une valeur maximale.

Au-delà l'amplitude de contraction reste

constante , et l'enregistrement a une forme de dents de scie , on l'appelle tétanos imparfait .

L'arrêt de l'excitation provoque le relâchement du muscle.



A grande fréquence chaque excitation est appliquée pendant la phase de contraction de la secousse précédente :

Au début on enregistre une fusion totale des secousses avec augmentation progressive de l'amplitude de contraction jusqu'à atteindre une valeur maximale.

Au-delà l'amplitude de contraction reste constante , et l'enregistrement est plat ,

on l'appelle tétanos parfait .

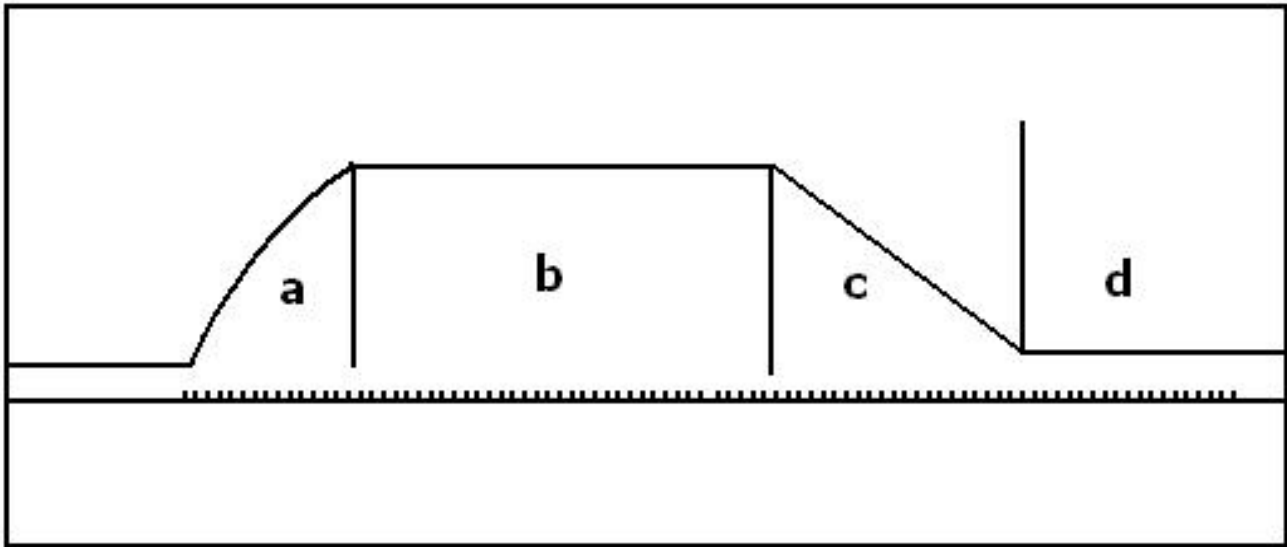
L'arrêt de l'excitation provoque le relâchement du muscle.

### c- Conclusion :

La réponse du muscle à l'excitation dépend de l'intensité de l'excitation et de la fréquence des excitations .

### d- Remarque :

Après une longue période d'excitations successives , on obtient le myogramme suivant , et on constate que le pH du muscle devient acide par accumulation de l'acide lactique .



On peut diviser le myogramme en 4 étapes :

- Etape a : fusion complète des secousses musculaires avec augmentation progressive de l'amplitude de la contraction jusqu'à la valeur maximale .
- Etape b : enregistrement d'un téтанos parfait
- Etape c : diminution progressive de l'amplitude de contraction , on parle de fatigue musculaire , elle est due à l'accumulation de l'acide lactique .
- Etape d : le muscle ne répond plus aux excitations, il perd temporairement ses caractéristiques d'excitabilité et de contractilité, à cause de l'accumulation de l'acide lactique dans le cytoplasme des myofibres , la diminution du pH inhibe le fonctionnement des protéines musculaires .

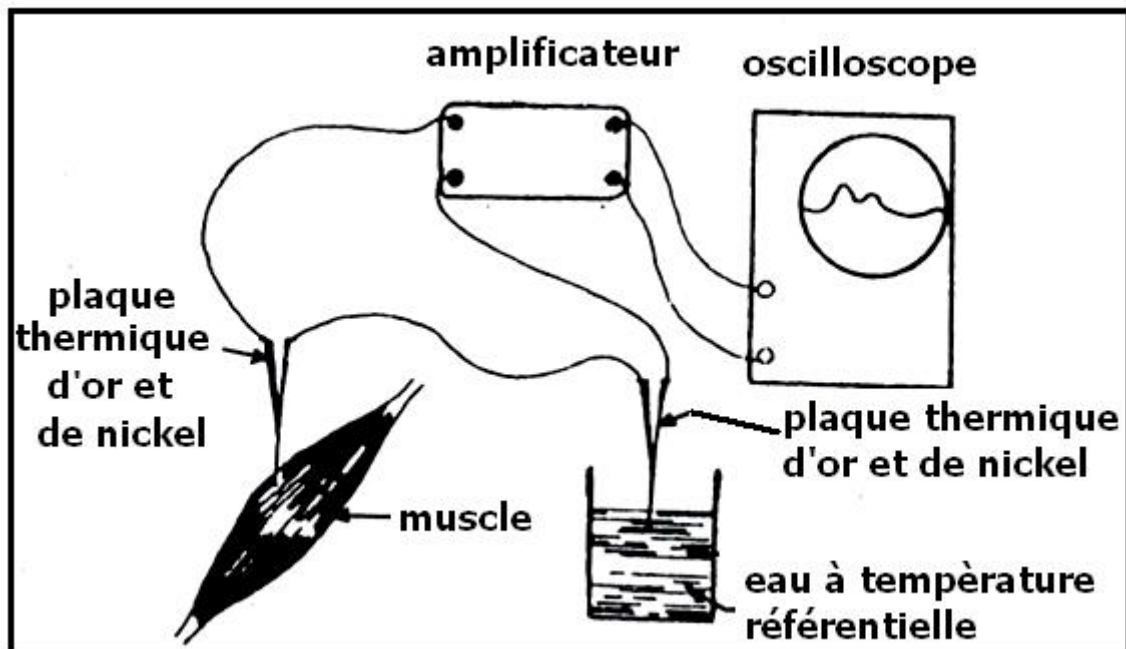
## 2- Les manifestations de la contraction musculaire :

### 2-1- les manifestations thermiques :

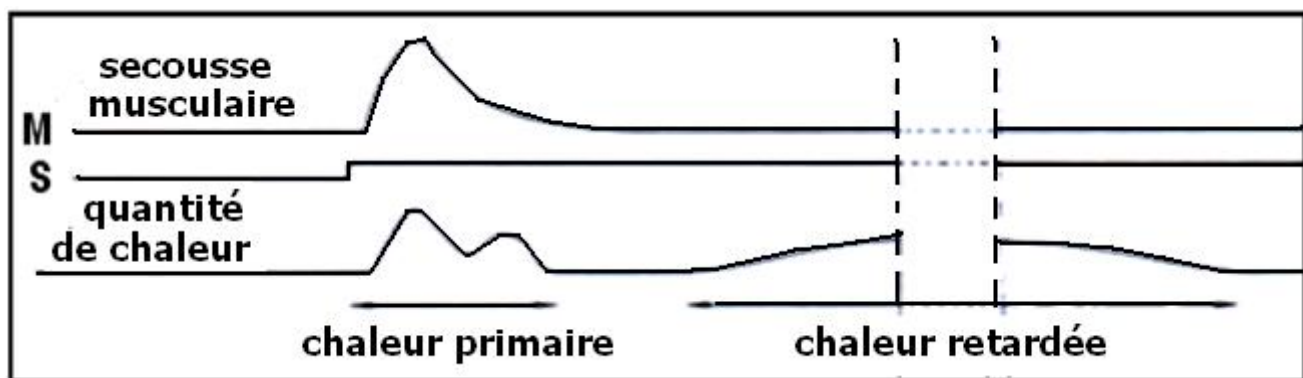
#### a- Mise en évidence :

On détecte les variations thermiques lors de l'activité d'un muscle par des plaques thermiques et on les enregistre par un oscilloscope .

Température nickel référentielle



### b- Enregistrement dans un milieu aérobie :



En aérobie l'activité d'un muscle libère deux quantités de chaleur :

- La chaleur primaire pendant la secousse musculaire de grande amplitude et de courte durée ; elle se divise en chaleur d'activation et de soutien libérées pendant la phase de contraction et en chaleur de relâchement libérée pendant la phase de relâchement .
- La chaleur retardée libérée après la secousse musculaire de faible amplitude et dure long temps .

### c- Conclusion :

Ces libérations de chaleur indiquent des réactions chimiques qui produisent ces manifestations thermiques .

## 2-2- les manifestations chimiques :

### 2-2-1- les réactions de production et de renouvellement d'ATP :

#### a- Les travaux de chevaux et Kaufman :

Ils ont mesurer la variation de certaines substances dans le sang passant par un muscle pendant le repos et en activité .

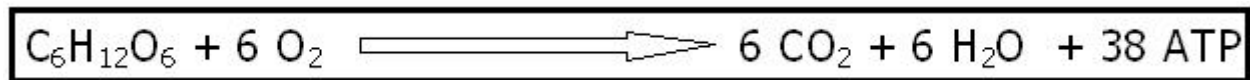
#### b- Résultats :

	Muscle au repos	Muscle en activité
Quantité de O <sub>2</sub> consommée en l	0.307	5.207
Quantité de CO <sub>2</sub> rejetée en l	0.220	5.950
Quantité de glucose consommée en g	0.307	8.432
Quantité de protides consommée en g	0	0
Quantité de lipides consommée en g	0	0

En activité la consommation de glucose et de dioxygène augmente , la production de CO<sub>2</sub> augmente , alors que les lipides et les protéines n'interviennent pas dans le métabolisme musculaire .

#### c- Conclusion 1 :

Le muscle utilise l'oxydation respiratoire du glucose dans son métabolisme énergétique selon la réaction suivante :

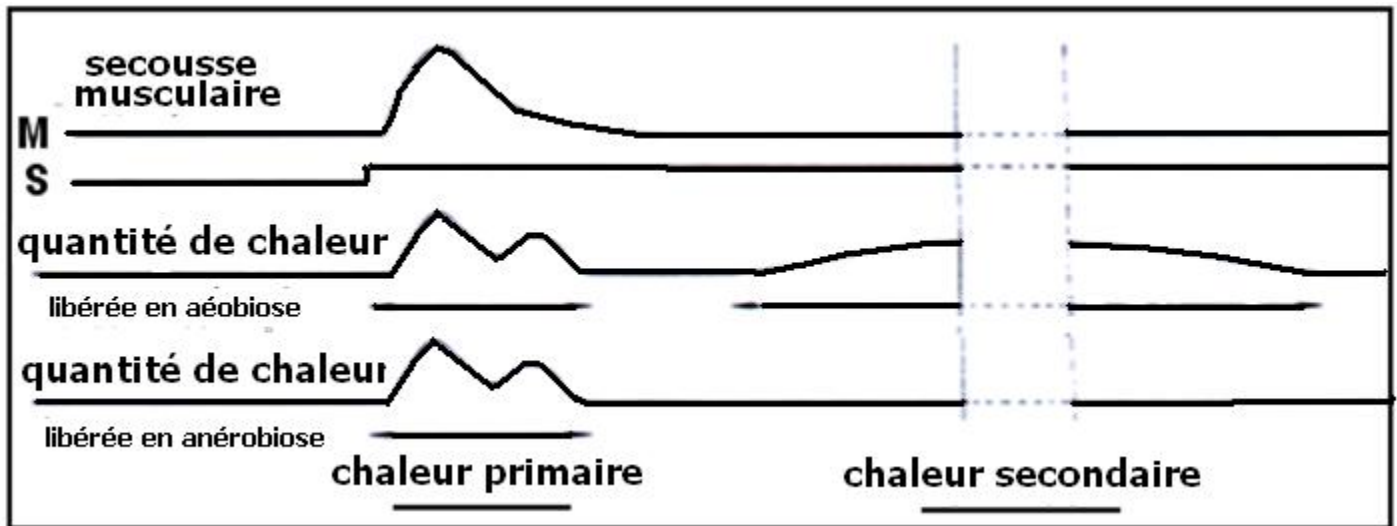


Les lipides et les protides ne sont pas des métabolites énergétiques pour la fibre musculaire .

#### d- Expérience 2 :

On mesure la quantité de chaleur libérée par le muscle en activité des aérobiose et en anaérobiose .

### e- Résultats :



En aérobiose on enregistre la chaleur primaire et la chaleur retardée

En anaérobiose on enregistre seulement la chaleur primaire

### f- Conclusion :

La chaleur retardée est le résultat de réactions métaboliques consommant le dioxygène.

La chaleur primaire est le résultat de réactions métaboliques rapides et indépendantes du dioxygène.

### g- Bilan :

La fibre musculaire possède deux voies métaboliques pour la production et le renouvellement d'ATP :

➤ Voie rapide anaérobique :

Renouvelle l'ATP par les réactions anaérobiques suivantes , et libère l'énergie primaire :

+ transfert d'énergie entre 2 ADP par une enzyme la myokinase





+ La fibre musculaire possède dans son cytoplasme une molécule de stockage de l'énergie appelée phosphocréatine ( PC ) , une Kinase permet la phosphorylation de l'ADP et le transfère de l'énergie de la phosphocréatine , selon la réaction suivante :

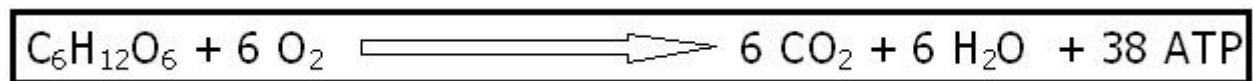


+ La fermentation lactique est la 3° source d'ATP dans la voie anaérobie :



➤ Voie lente aérobie :

Produit l'ATP par l'oxydation respiratoire du glucose et libère l'énergie retardée :



h- Remarque :

la fibre musculaire emmagasine le glucose dans son cytoplasme sous forme de glycogène , qu'il hydrolyse pendant son activité pour avoir du glucose , et fixe O<sub>2</sub> par la myoglobine .

2-2-2- libération de Ca<sup>2+</sup> :

L'équorine est une substance chimique qui devient lumineuse en fixant Ca<sup>2+</sup> .

a- Expérience 1 :

Après injection de l'équorine dans le cytoplasme d'une cellule musculaire , on applique une excitation efficace .

## b- Résultat 1 :

Juste après l'excitation le cytoplasme s'éclaire et la fibre se contracte  
L'éclairement disparaît et la fibre se relâche

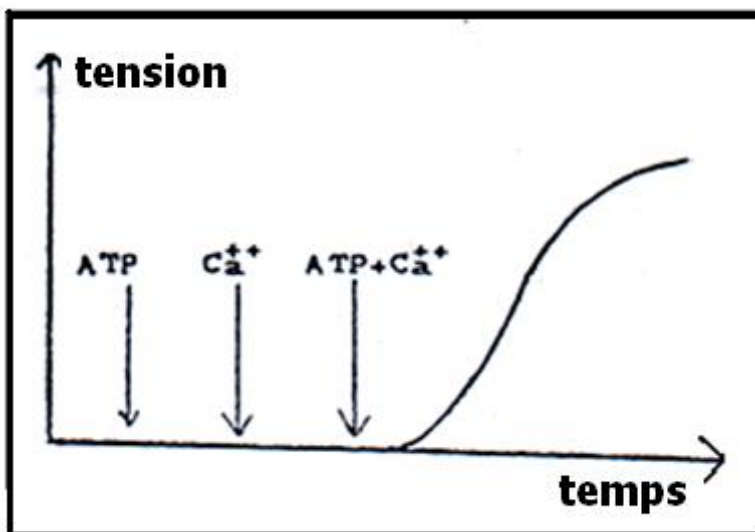
## c- conclusion 1 :

l'excitation induit l'apparition de  $\text{Ca}^{2+}$  qui provoque la contraction  
la disparition de  $\text{Ca}^{2+}$  provoque le relâchement  
dans le cytoplasme de la fibre musculaire il y a des tubules qui stockent  $\text{Ca}^{2+}$ , il le libère à l'excitation et le récupère après la contraction .

## d- expérience 2 :

on injecte dans le cytoplasme d'une fibre musculaire des ions  $\text{Ca}^{2+}$  ; ou de l'ATP ou  $\text{Ca}^{2+} + \text{ATP}$  , et on détermine la tension de la fibre après chaque injection

## e- résultats :



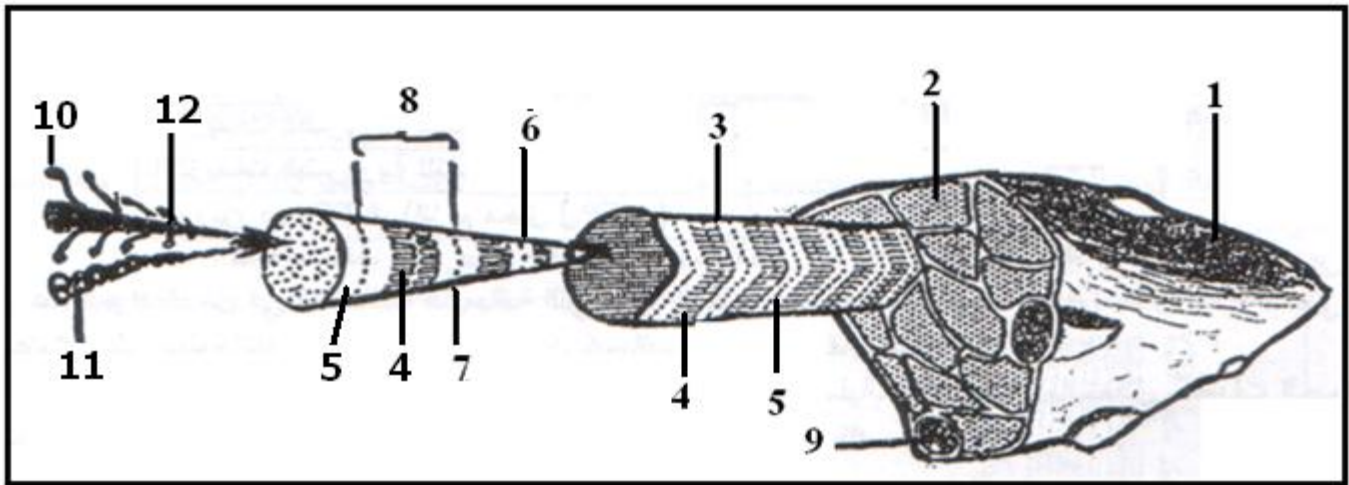
après injection de  $\text{Ca}^{2+}$  ou d'ATP , on n'enregistre aucune tension de la fibre musculaire  
l'injection de  $\text{Ca}^{2+} + \text{ATP}$  provoque la contraction de la fibre musculaire d'où enregistrement d'une tension musculaire .

## f- conclusion 2 :

la présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et d'ATP est indispensable à la contraction .

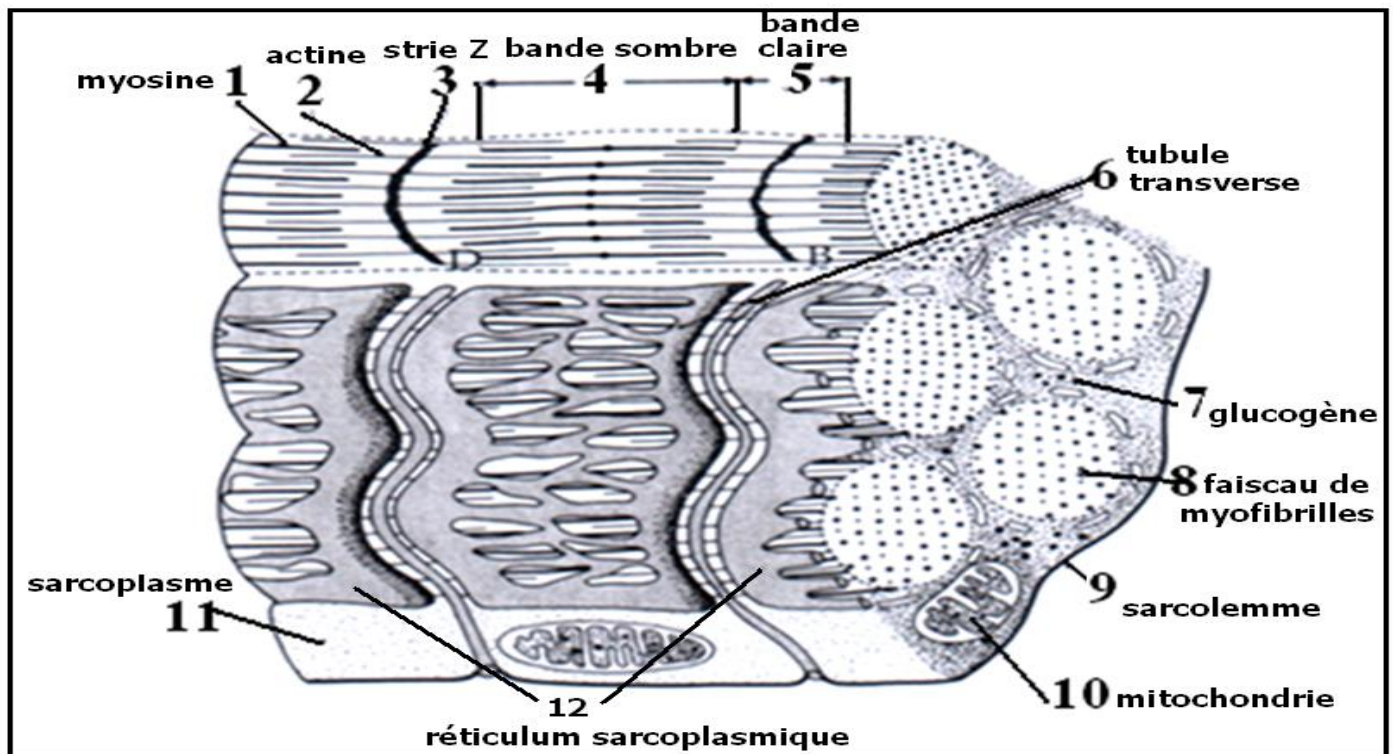
### 3- structure et ultra structure du muscle :

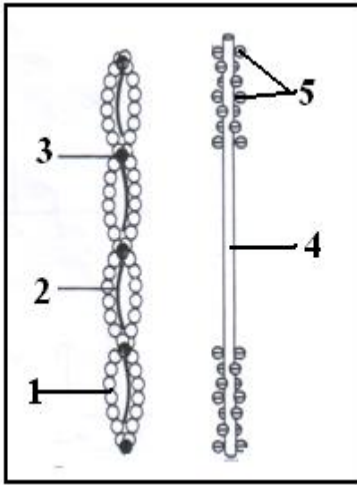
à l'œil nue le muscle ( 1 ) est formé de faisceaux de fibres musculaires ( 2 ) qui reçoivent des vaisseaux sanguins ( 9 ) .



Au microscope optique ,le cytoplasme de la fibre musculaire ( 3 ) renferme des faisceaux de fibrilles musculaires ou myofibrilles ( 6 ) et porte une alternance de bande claire ( 5 ) et de bande sombre ( 4 ) ce qui donne à la fibre musculaire et au myofibrille un aspect strié d ' où le nom de muscle strié .

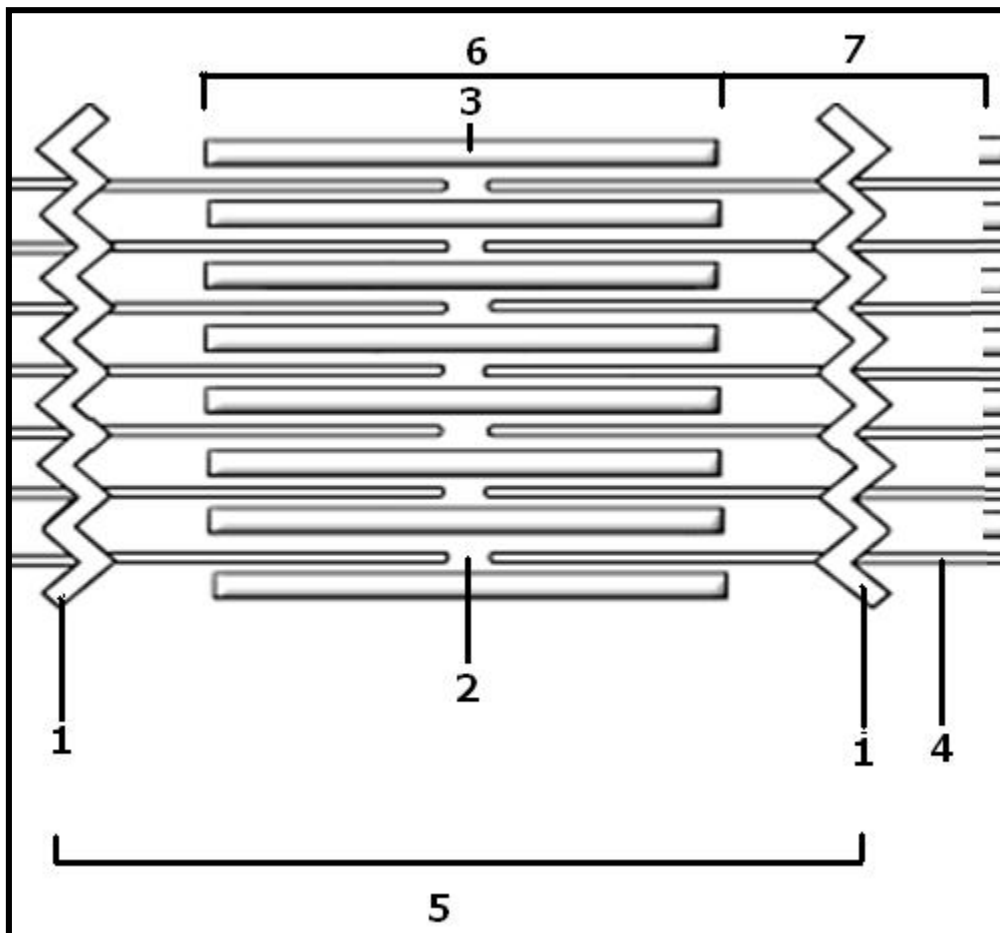
Au microscope électronique la myofibrille est constituée de protéines filamenteuses , des filaments fins d'actine ( 11 ) et des filaments épais de myosine ( 12 ) qui portent des têtes de myosines ( 10 ).qui s'organisent et forment des sarcomères ( 8 )



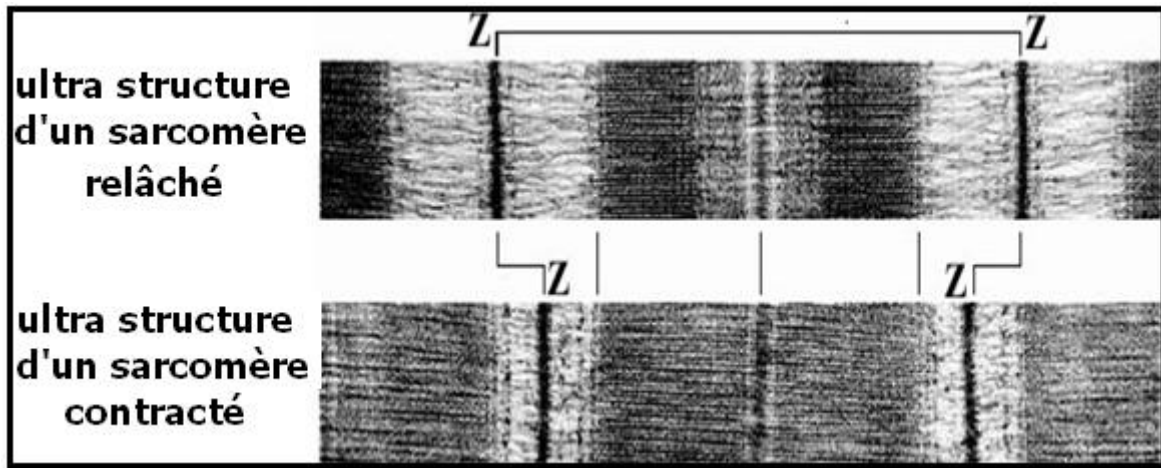


les filaments fins sont formés d'unités d'actines ( 1 ) et de protéines régulatrices de la contraction troponines et tropomyosines ( 2 ) , ils portent des sites d'attachements des têtes de myosines ( 3 )  
 les filaments épais de myosine ( 4 ) portent les têtes de myosines ( 5 )

la répartition des filaments d'actines et de myosines est ordonnée dans les myofibrilles et donne l'unité structurale de la fibre musculaire : le sarcomère



Comparons un sarcomère en relâchement et un sarcomère en contraction :

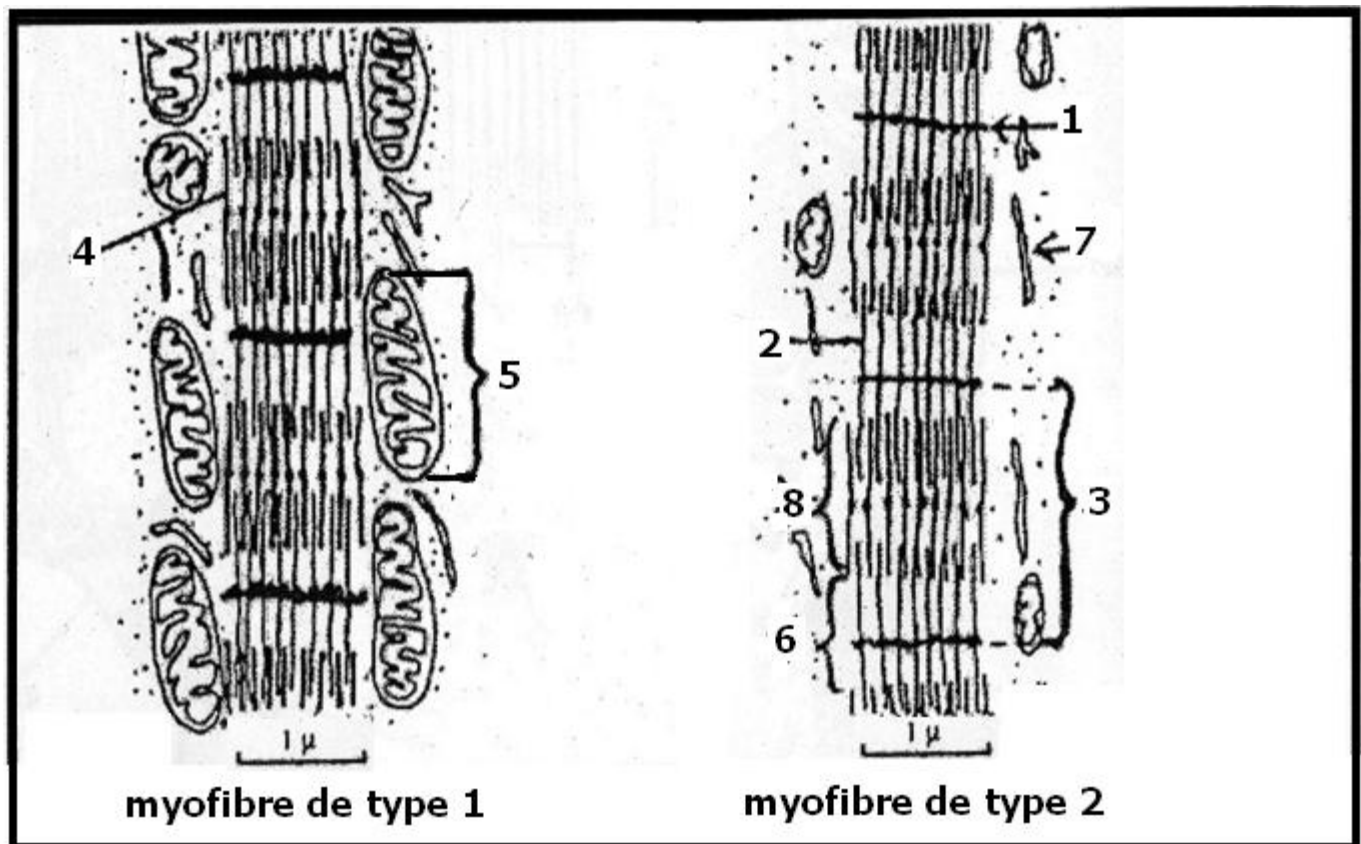


Quand le sarcomère est relâché les stries Z sont éloignées , la zone H est large , la longueur du sarcomère est grande .

Quand le sarcomère est contracté les stries Z sont rapprochées, la zone H est rétrécie , la longueur du sarcomère se réduit .

La contraction donc est le résultat du glissement des myofilaments d'actines entre les myofilaments de myosine.

Le muscle est composé de deux types de myofibres type 1 et type 2 :



Les myofibres de types 1 sont riches en mitochondries de grandes tailles , ces myofibres synthétisent et renouvellent l'ATP en se basant sur l'oxydation respiratoire , elles sont qualifiées de fibres lentes .

Ces fibres sont riches en capillaires sanguins et en myoglobines qui stocke  $O_2$  .

Les myofibres de types 2 sont pauvres en mitochondries de petites tailles , ces myofibres synthétisent et renouvellent l'ATP en se basant sur la voie rapide , elles sont qualifiées de fibres rapides .

Ces fibres sont pauvres en capillaires sanguins et en myoglobines.

Dans les muscles d'une personne qui ne pratique aucune activité sportive ; les deux types de myofibres sont présentes en même pourcentage , chez le sportif , le pourcentage varie selon le type de sport pratiqué :

- chez le sportif qui exerce un grand effort pendant une longue durée ; l'entraînement conduit à une augmentation du pourcentage des myofibres lente de type 1 , ce qui évite le recours des fibres à la fermentation lactique et la fatigue du muscle.
- chez le sportif qui exerce un grand effort pendant une courte durée ; l'entraînement conduit à une augmentation du pourcentage des myofibres rapides de type 2 , ce qui permet aux fibres de produire rapidement de grande quantité d'ATP pour répondre aux besoins du muscle .

#### 4- conclusion : mécanisme de la contraction et la transformation de l'énergie :

l'activité du muscle et la transformation de l'énergie se font en plusieurs étapes :

- ✓ l'excitation directe du sarcolème ou par l'intermédiaire de la synapse neuromusculaire produit des potentiels d'actions qui se propagent le long du sarcolème , et , atteignent par les tubules T le réticulum sarcoplasmique .
- ✓ ouverture des canaux  $Ca^{2+}$  de la membrane du réticulum sarcoplasmique et diffusion de  $Ca^{2+}$  dans le sarcoplasme .
- ✓ fixation de  $Ca^{2+}$  sur les troponines et les tropomyosines , qui changent de configuration et dévoile les sites de fixation des têtes de myosine sur l'actine .
- ✓ élongation des têtes de myosine porteuses d'ATP , et attachement à leurs sites de fixation sur l'actine , formation de pont actomyosine et de complexes actomyosine ATP : phase d'attachement .
- ✓ activation d'enzymes ATPase des têtes de myosine , hydrolyse d'ATP et libération de l'énergie chimique

- ✓ les têtes de myosine utilisent l'énergie chimique libérée pour déplacer les filaments d'actine vers le centre du sarcomère la zone H , d'où contraction , c'est la phase du pivotement au cours de laquelle il y a transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique
- ✓ le réticulum sarcoplasmique ferme les canaux  $\text{Ca}^{2+}$  ; et active les pompes calcium ATPase pour le transport actif de  $\text{Ca}^{2+}$  du sarcoplasme vers la cavité du réticulum sarcoplasmique .
- ✓ les troponines et les tropomyosines se débarrassent des ions  $\text{Ca}^{2+}$  , reprennent leurs configurations initiales , et les têtes de myosine porteuses d'ATP se détachent de leurs sites de fixation sur l'actine , provoquant le relâchement : phase de séparation .

