www.students.ma

Chapitre 2 : Le 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. Cette énergie est utilisée par hydrolyse de l'ATP au cours du transport actif, des synthèses cellulaires (synthèse de différentes substances) et du travail mécanique (mouvement).

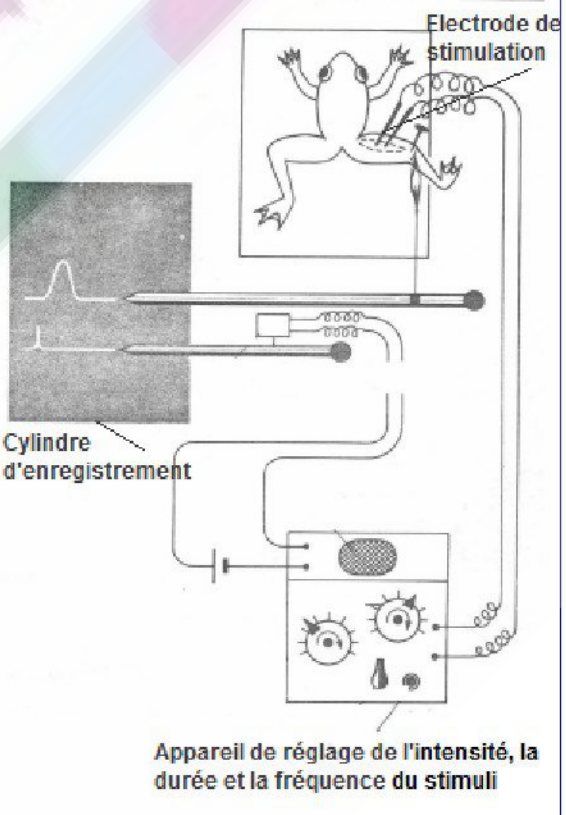
Le muscle squelettique strié est un bon exemple d'organe spécialisé dans la production du travail mécanique. Les cellules qui le constituent s'appellent « fibres musculaires ».

- **Quels sont les mécanismes de conversion de l'énergie au niveau de la fibre musculaire ?**
- **Quel est le mécanisme de la contraction musculaire ?**
- **Quels sont les phénomènes métaboliques accompagnant la contraction musculaire ?**

I. Enregistrement de la contraction musculaire :

1. Etude expérimentale :

- Chez une grenouille, on procède à la destruction de l'encéphale et de la moelle épinière.
- La dissection du membre postérieur permet de dégager le muscle gastrocnémien et le nerf sciatique.
- Avec une épingle on fixe le genou sur une plaque.
- On sectionne le tendon d'Achille et on le relie, à travers un fil, au système d'enregistrement.
- Lors de sa contraction, le muscle supporte une masse faible et constante. On parle de contraction isotonique.
- On applique des excitations à travers le système excitateur, et grâce au stylet inscripteur, on enregistre le myogramme sur un cylindre tournant à vitesse déterminé.



Document 1 : Dispositif expérimental pour étudier la contraction musculaire chez la grenouille

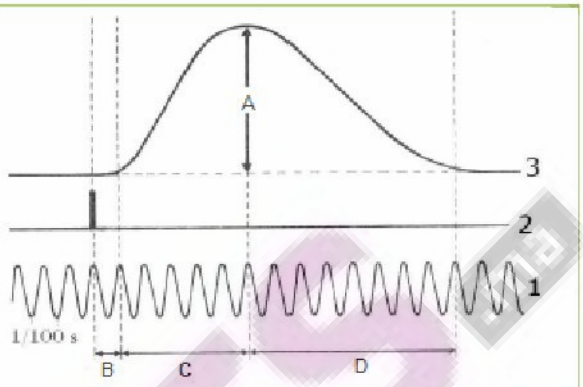
www.students.ma

www.students.ma

2. Etude des enregistrements de la contraction musculaire :

a. Réponse musculaire à un stimulus liminaire :

Le cylindre tournant à une vitesse déterminée, on applique au nerf sciatique une stimulation dont l'intensité donne une contraction musculaire à amplitude maximale.



Document 2 : Secousses musculaires isolée : 1- L'échelle du temps ; **2-** Artéfact de stimulation ; **3-** Myogramme.

Questions : 1. Décrivez l'enregistrement obtenu en définissant ses phases et leurs durées.

2. Quels sont les propriétés du muscle mises en évidence ?

Réponses :

1. 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 a l'arrive 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.

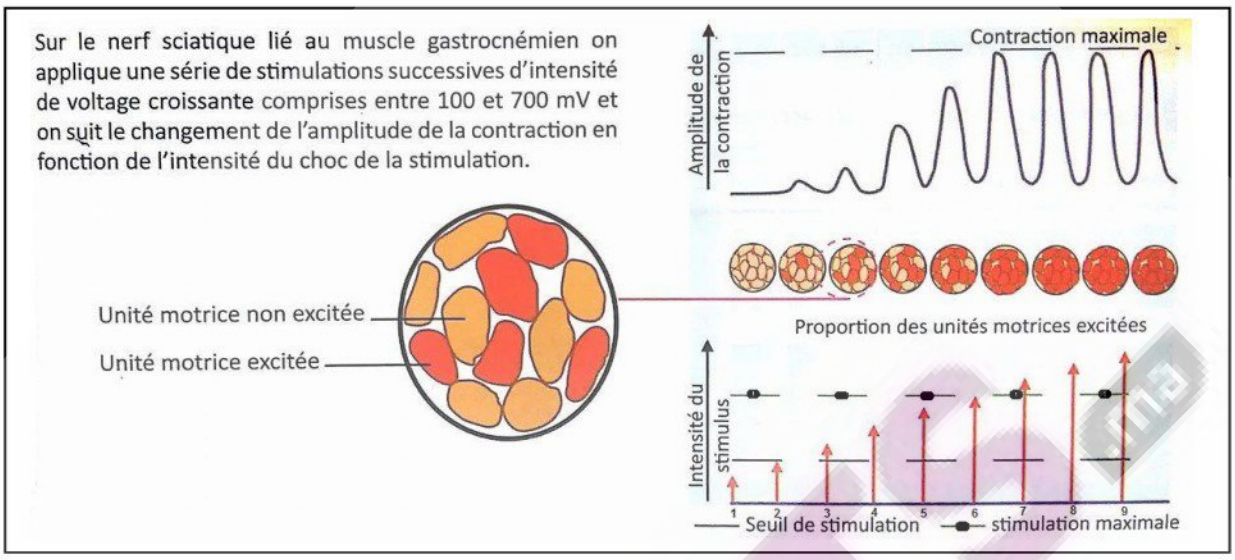
- **La phase de relâchement :** la contraction ne s'exerce plus, le raccourcissement diminue pour revenir à sa valeur de repos. La durée de relâchement est toujours supérieure à celle de la contraction.

2. Les muscles possèdent certaines propriétés particulières qui leurs permettent de remplir leurs fonctions. Les propriétés mise en évidence ici sont l'excitabilité et la contractilité.

b. Réponse musculaire à une série de stimulation efficace successives et d'intensité croissante :

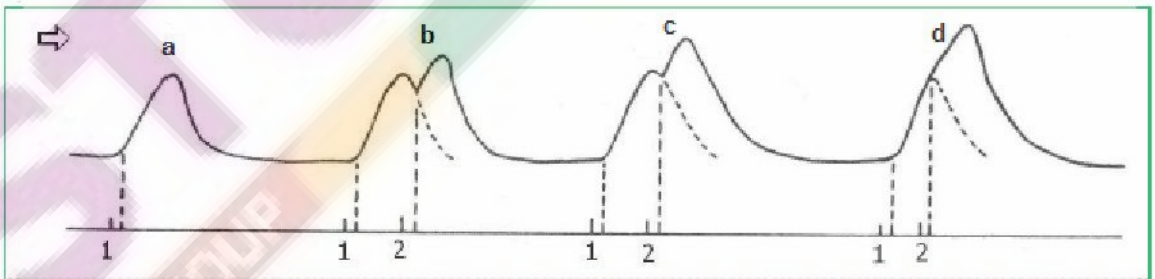
www.students.ma

www.students.ma



- **S1 :** le myogramme n'enregistre aucune secousse musculaire, puisque le muscle ne répond pas à une excitation infraliminaire (en dessous de la rhéobase).
- **De S2 à S6 :** le myogramme enregistre des secousses musculaires d'amplitudes croissantes, dues aux intensités croissantes des stimulations et donc l'accroissement des unités motrices excitées.
- **De S6 à S9 :** le myogramme enregistre des secousses musculaires isolées de même amplitude malgré l'intensité croissante des stimulations. Ceci est dû à l'excitation de toutes les unités motrices.
- Le stimulus est dit liminaire lorsqu'il a la valeur seuil (Rhéobase). Lorsque le stimulus a une intensité supérieure à celle du seuil il est dit supraliminaire (contraire d'infraliminaire).

c. Réponse musculaire à deux excitations efficaces de même intensité :



Le cylindre tournant à vitesse constante, on applique une simulation efficace, mais qui ne donne pas l'amplitude maximale de la contraction musculaire dans le cas de la secousse isolée
a- Simulation unique.
b- Deux stimulations successives : La deuxième est appliquée lors de la phase du relâchement correspondant à la première secousse.
c- Deux simulations successives : La deuxième survient lors de la phase du relâchement, avec diminution de l'écart temporel entre les deux stimulations.
d- Deux stimulations successives : La deuxième survient lors de la phase de contraction.

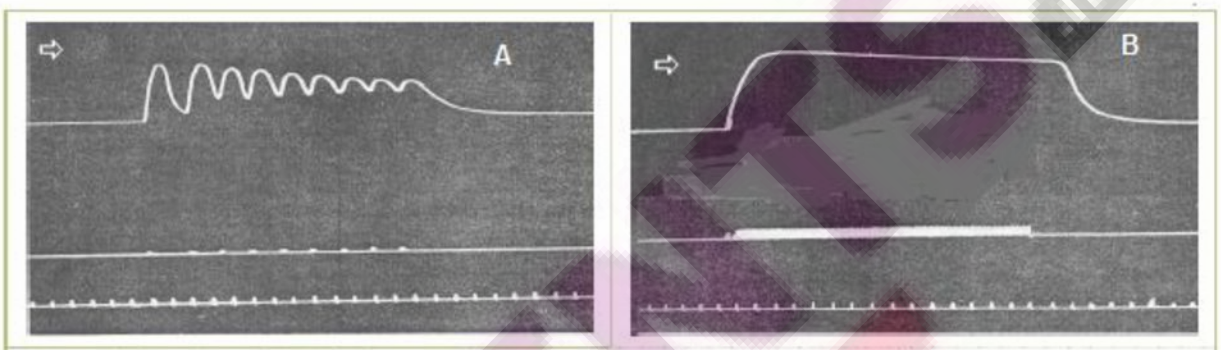
Document 4 : L'effet de deux simulations successives avec une intensité qui ne donne pas l'amplitude maximale de la contraction musculaire.

www.students.ma

www.students.ma

- **b et c :** 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 total (d).

d. Réponse musculaire à une série d'excitations efficaces successives et de même intensité :



On applique des stimulations qui donnent l'amplitude maximale de la contraction musculaire. Les simulations successives se répètent avec une fréquence de 10 à 15 simulations par seconde (figure de gauche), ou avec une fréquence de 25 à 30 simulations par seconde (figure de droite). Les secousses successives fusionnent partiellement ou totalement. On parle de tétanos imparfait ou parfait.

Documents 6 : Le tétanos.

- **Figure A :** Si la fréquence des excitations fait en sorte que l'excitation suivante arrive au muscle pendant la phase de relâchement de la secousse relative a l'excitation précédente , le myogramme obtenu donne des secousses avec fusion incomplète , on parle du : Tétanos imparfait.
- **Figure B :** Si la fréquence des excitations fait en sorte que l'excitation suivante arrive au muscle pendant la phase de contraction de la secousse relative a l'excitation précédente, le myogramme augmente d'amplitude de façon régulière et présente un plateau régulier. on parle du : Tétanos parfait.

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

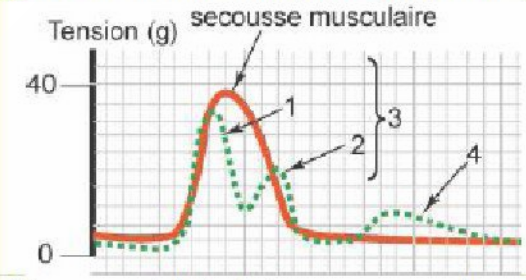
1. Les phénomènes thermiques accompagnant la contraction musculaire :

www.students.ma

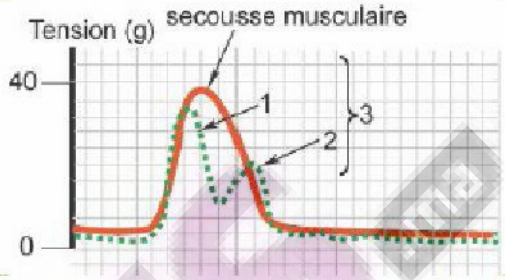
www.students.ma

• Avec un dispositif expérimental adéquat, on peut enregistrer la contraction musculaire et le dégagement de chaleur qui l'accompagne. La chaleur est dégagée par des réactions biochimiques exothermiques. Le graphique ci-contre montre les résultats obtenus.

• Si on met le muscle dans un milieu aérobie, le muscle se contracte, mais la chaleur retardée diminue de façon remarquable.



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.

Document 1 : Mise en évidence de la chaleur qui accompagne la contraction musculaire

Questions :

1- Expliquez l'augmentation du dégagement de la chaleur au cours de l'effort musculaire.

2- Précisez les types de chaleur dégagés par le muscle en activité.

Réponses :

1- Seule une proportion de l'énergie libérée par la contraction musculaire est convertie en travail utile. le reste est transformé en chaleur, ce qui permet de maintenir la température de l'organisme. Cette chaleur est dégagée grâce à la transpiration, le rayonnement de la chaleur par la peau , les frissons…. pour ne pas atteindre un niveau dangereux.

2- 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, dégagé au cours de la phase de relâchement.

La chaleur retardée se dégagée lentement après la secousse.

2. Origine de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire :

• Au niveau de la lèvre supérieure du cheval, on a analysé le sang veineux et le sang artériel d'un muscle ; et on a constaté ce qui suit :

• Au cours de la contraction musculaire, il y a augmentation du volume du sang qui traverse le muscle, de la quantité de CO_2 rejetée, et des quantités d'oxygène et de glucose consommées. Ainsi qu'une diminution des réserves de glycogène dans le muscle.

• Chez l'homme, on a remarqué que la quantité d'oxygène consommée augmente avec l'intensité de l'exercice musculaire, pour se stabiliser à un certain niveau. À partir de cette étape, on détecte l'apparition de l'acide lactique dans le sang.

Document 2 : les phénomènes chimiques accompagnant la contraction musculaire.

➢ **Déduisez les besoins de la contraction musculaire.**

-

www.students.ma

www.students.ma

- 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 anaérobique la fermentation vient remplacer la respiration.

III. Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique :

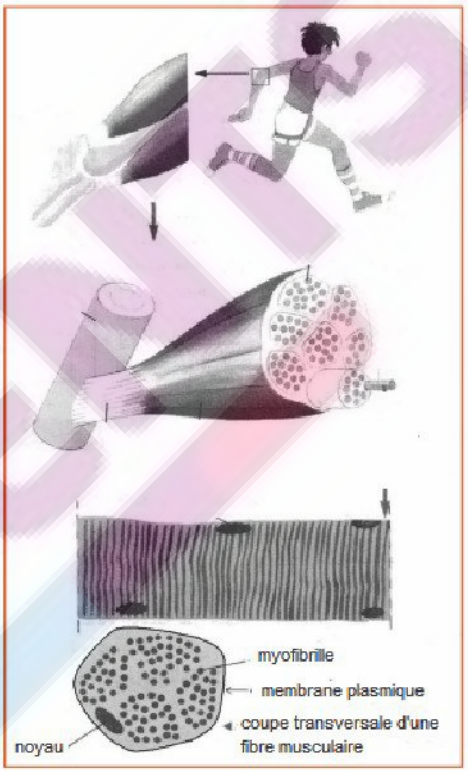
1. Observations du tissu musculaire :

Chaque muscle est constitué de centaines ou de milliers de fibres musculaires. La fibre musculaire est une cellule fusiforme dont le diamètre varie entre 10 et 100 µm. La longueur peut atteindre quelques centimètres. C'est une cellule géante qui possède des centaines de noyaux. En effet, elle résulte de la fusion d'un grand nombre de cellules au cours du développement embryonnaire.

Observé au microscope optique, le cytoplasme de la fibre musculaire présente une succession de bandes claires et sombres. D'où l'appellation « muscle strié ». Squelettique ; c'est en rapport avec le squelette.

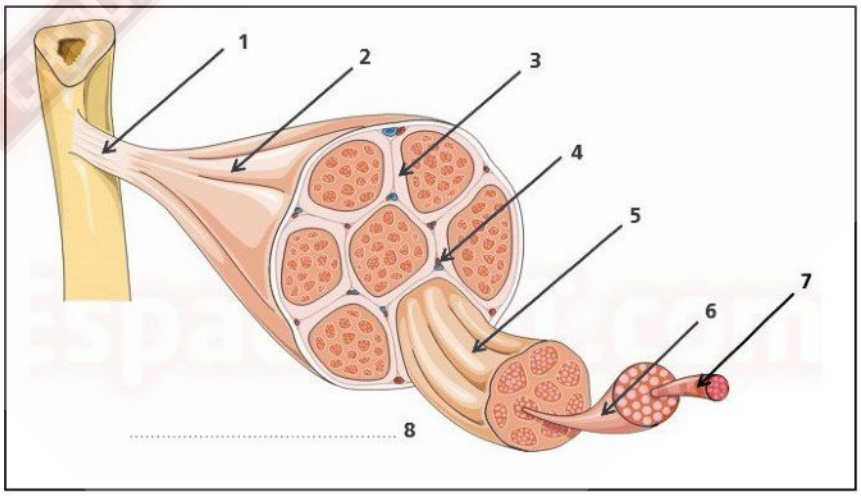


La majorité du volume du cytoplasme est occupée par des centaines ou des milliers de cylindres parallèles au grand axe de la fibre. Ce sont les myofibrilles qui se caractérisent par la contractilité. Au niveau du cytoplasme on trouve aussi plusieurs noyaux ; des mitochondries ; des réserves de glycogène ...



Document 1 : L'organisation du muscle squelettique strié.

➢ **Lisez le document ci-dessus et légendez la figure suivante :**



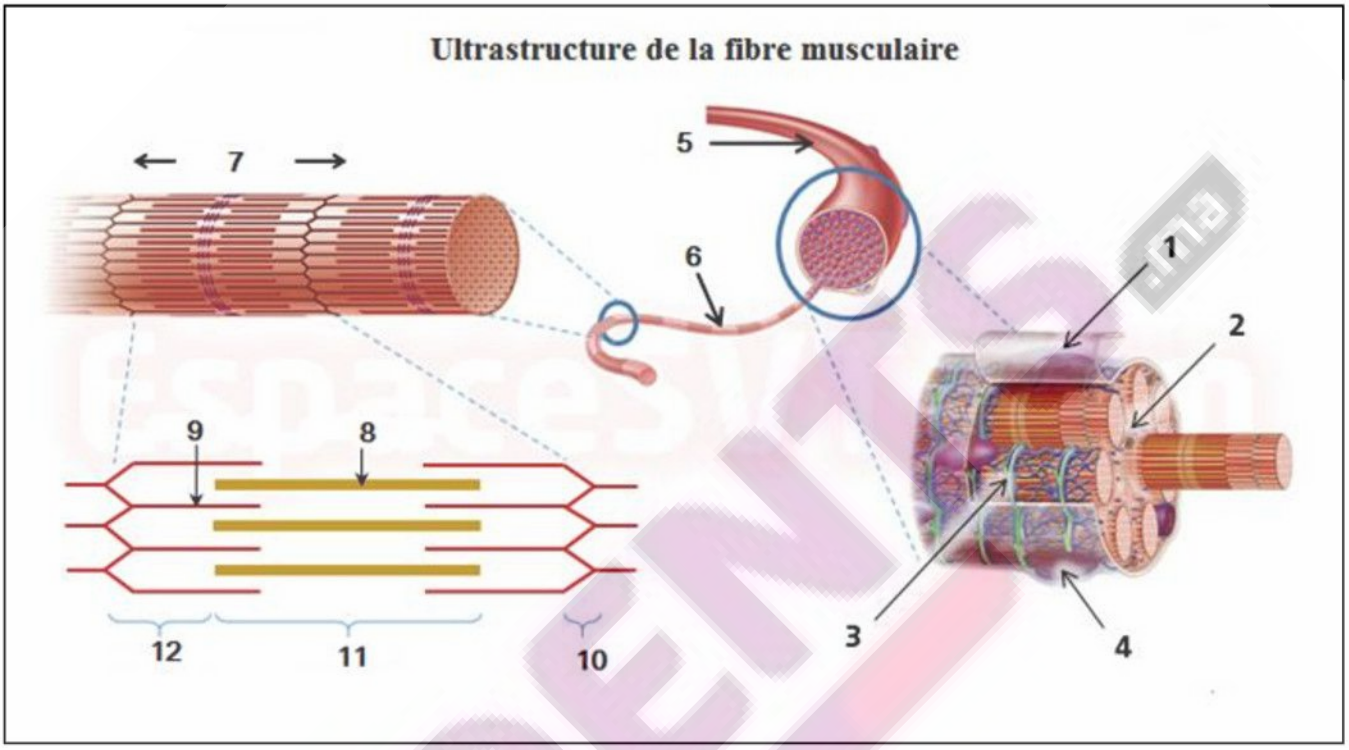
www.students.ma

www.students.ma

1 . tendon 2.muscle 3.tissu conjonctif 4.vaisseaux sanguins 5.faisceau musculaire

6.fibre musculaire 7.myofibrille 8. Dessin schématisé d'un muscle strié

2. Ultrastructure de la fibre musculaire :



➢ **Légendez la figure ci-dessus et décrivez la structure du filament musculaire :**

1= membrane sarcoplasmique 2= sarcoplasme 3= réticulum sarcoplasmique riche en Ca_2^+

4= noyau 5= filament musculaire 6= myofibrille 7= sarcomère 8= filament épais de myosine

9= filament fin d'actine 10= strie Z 11= bande sombre 12= bande claire

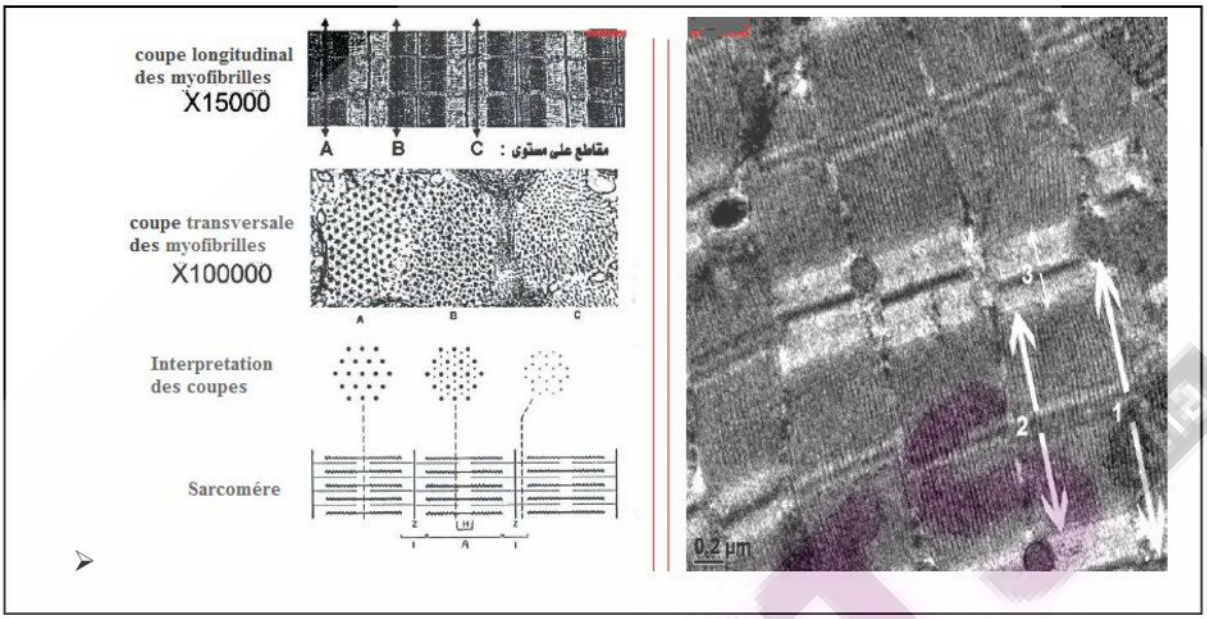
- Chaque fibre musculaire est une longue cellule cylindrique renfermant de nombreux noyaux ovales et entourée par le sarcoléme (membrane sarcoplasmique).
  Le sarcoplasme d'une fibre musculaire est comparable au cytoplasme des autres cellules, mais il abrite des myofibrilles, le réticulum sarcoplasmique et des réserves importantes de glycogène. Chaque fibre musculaire comporte un grand nombre de myofibrilles parallèles qui parcourent toute la longueur de la cellule. Ils représentent les éléments contractiles des cellules musculaires. Sur la longueur de chaque myofibrille, on remarque une alternance de bandes foncées et de bande claires.

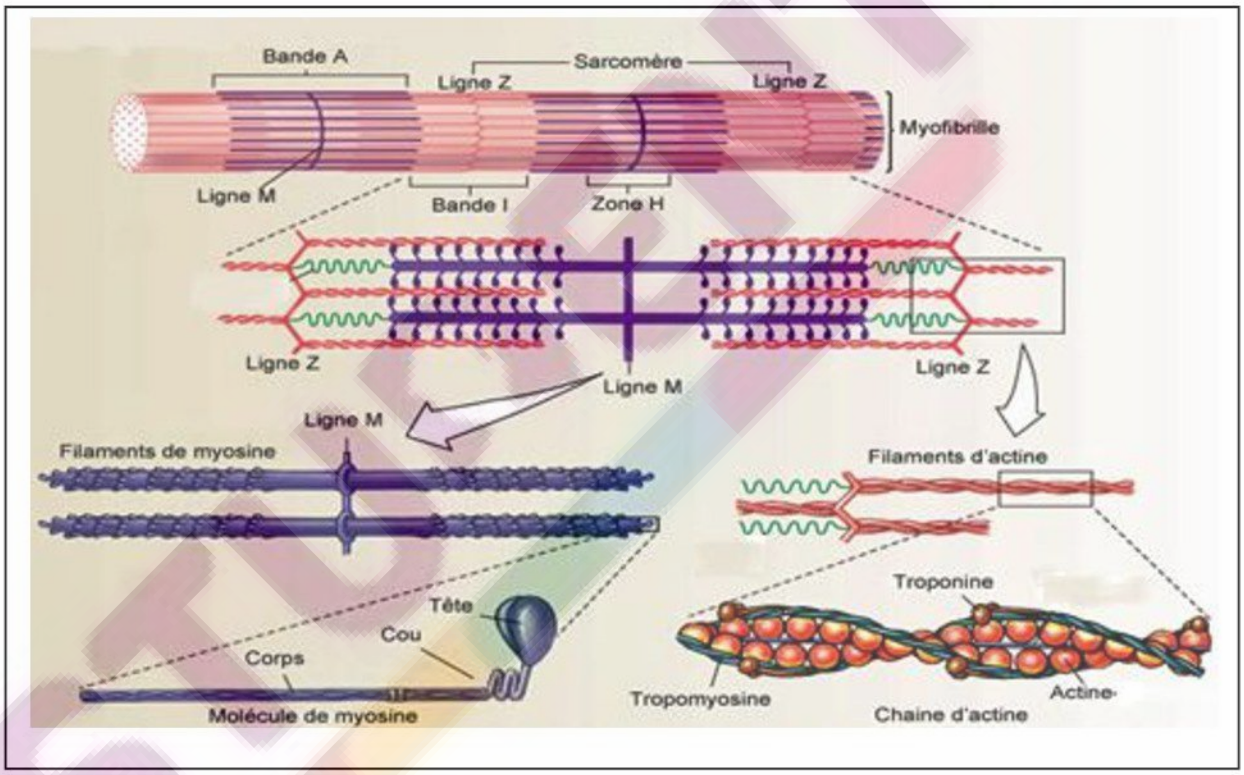
3. Ultrastructure de la myofibrille :

a. Observation des myofibrilles au microscope électronique :

www.students.ma

www.students.ma





➢ **Décrivez les coupes transversales des myofibrilles .**

Au microscope électronique, la myofibrille présente une alternance de 2 types de bandes :

+ Bandes claires (I = Isotripique) , 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.

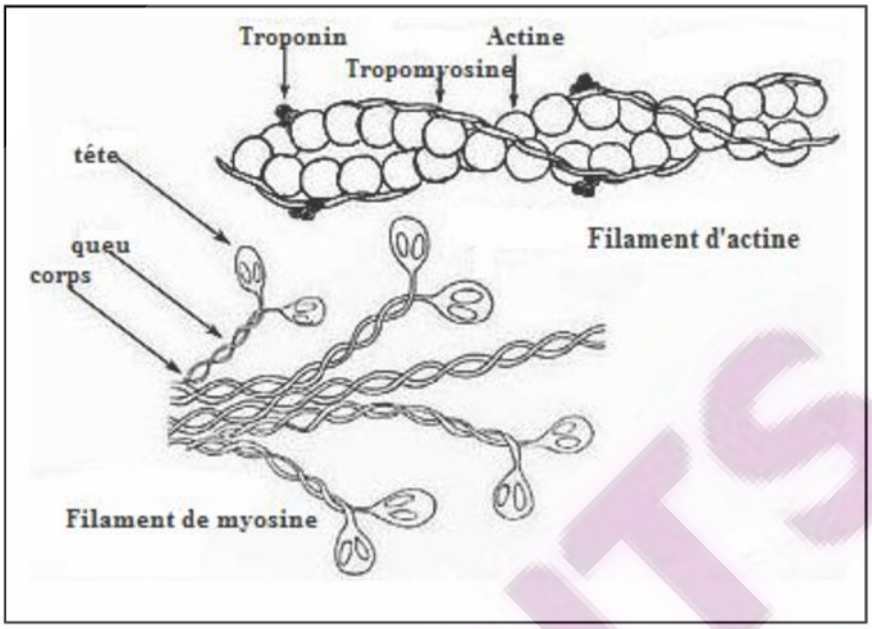
+ Bandes sombres (A = Anisotropique), formés de filaments épais constitués d'une protéine appelé Myosine. Au milieu de la bande sombre (A), on trouve une bande relativement claire. C'est la bande H.

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.

www.students.ma

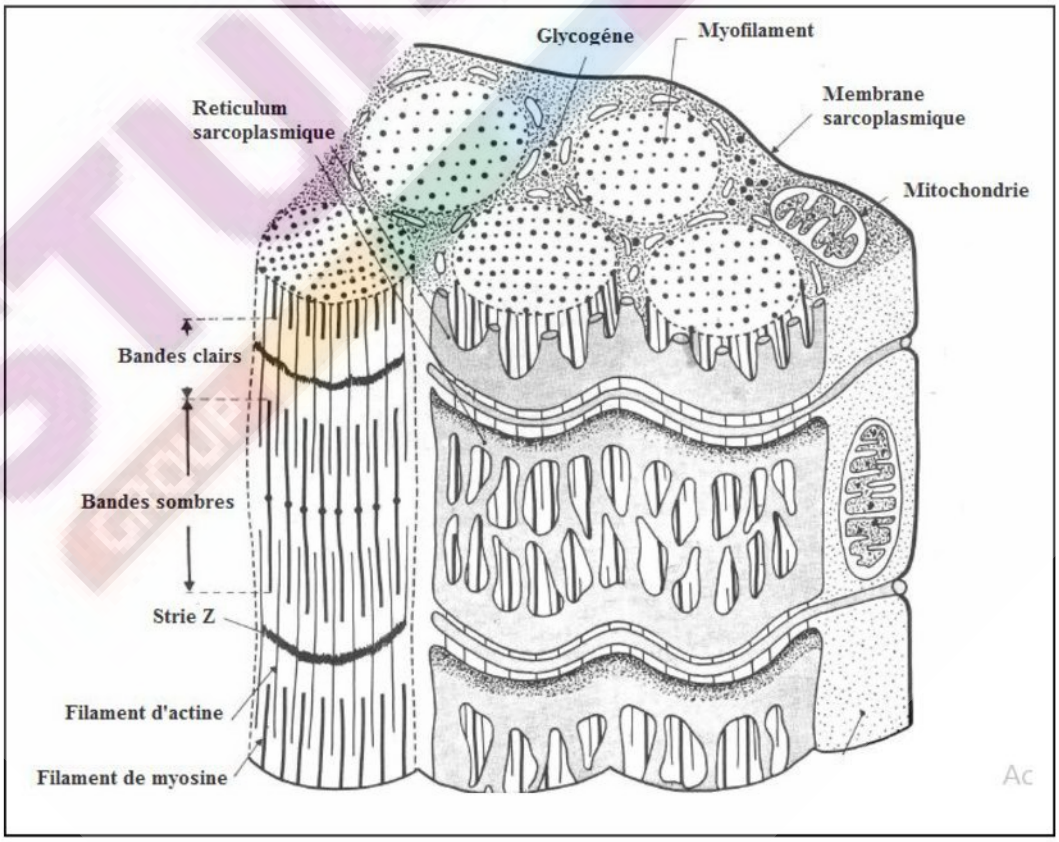
www.students.ma

b. Les constituants moléculaires de myofilaments :



- Le filament fin d'actine est constitué de trois types de protéines : l'actine, la troponine et la tropomyosine.
- Le filament épais de myosine est constitué de plusieurs molécules ressemblant a des bâtonnets. Chaque bâtonnet se termine par une tête bilobée.

c. Organisation d'une fibre musculaire :



www.students.ma

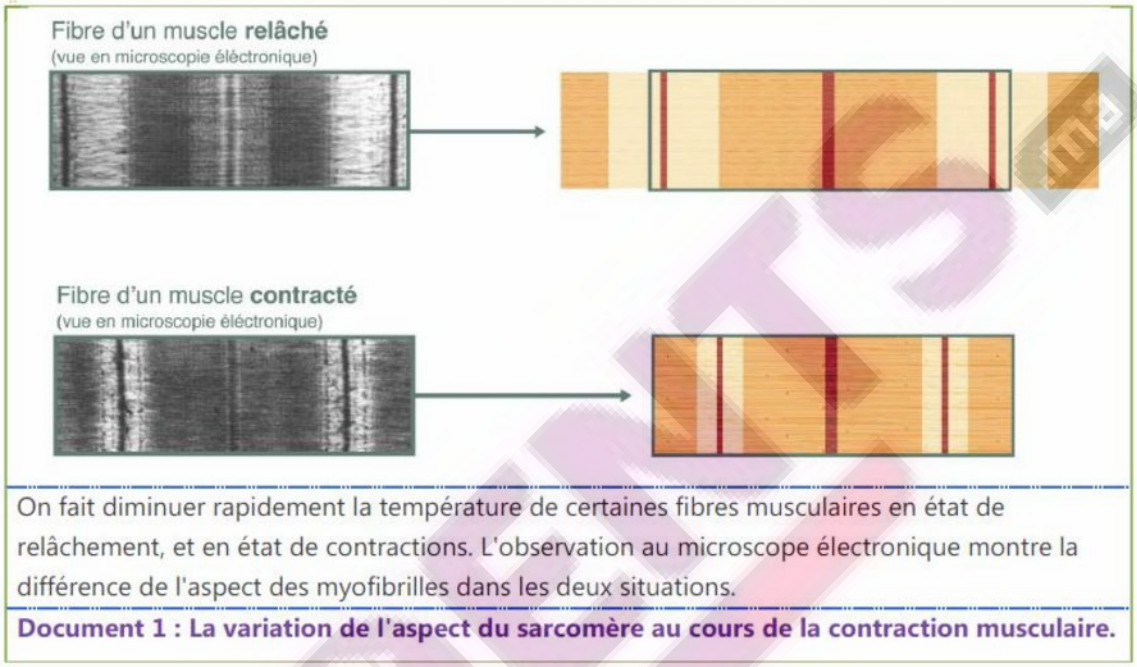
www.students.ma

Le sarcoplasme est riche en mitochondries et en glycogéne , alors que le réticulum sarcoplasmique est riche en calcium $Ca2^{+}$.

IV. Mécanisme de la contraction musculaire :

1. Le glissement des myofilaments :

a. Observations :



On fait diminuer rapidement la température de certaines fibres musculaires en état de relâchement, et en état de contractions. L'observation au microscope électronique montre la différence de l'aspect des myofibrilles dans les deux situations.

Document 1 : La variation de l'aspect du sarcomère au cours de la contraction musculaire.

➢ **Comparez l'aspect du sarcomère dans les 2 cas et précisez les changements qui affectent la myofibrille au cours de la contraction .**

Au cours de la contraction musculaire on observe :

- Rapprochement des 2 stries Z
- Raccourcissement du sarcomère.
- Raccourcissement des bandes claires
- Les bandes sombres ne changent pas de taille.
- Raccourcissement de la bande H et sa disparition parfois.

b. Explications et conclusion :

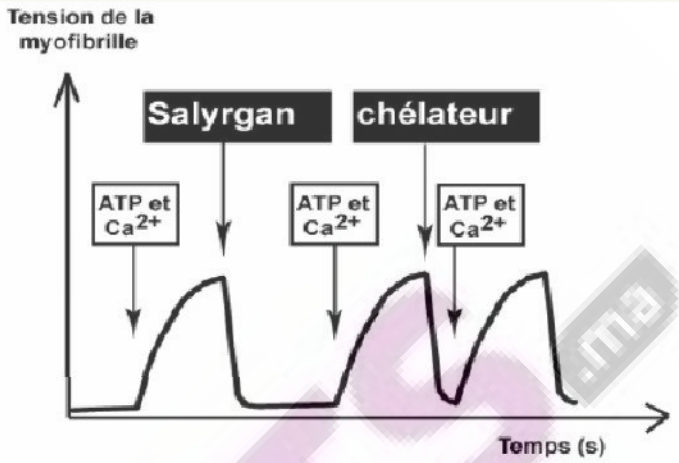
Puisque les bandes sombres ne changent pas de taille ; on peut expliquer le raccourcissement observé au niveau du sarcomère après la contraction par un glissement des filaments fins d'actine le long des filaments épais de myosine , de telle sorte que les myofilaments se chevauchent.

www.students.ma

www.students.ma

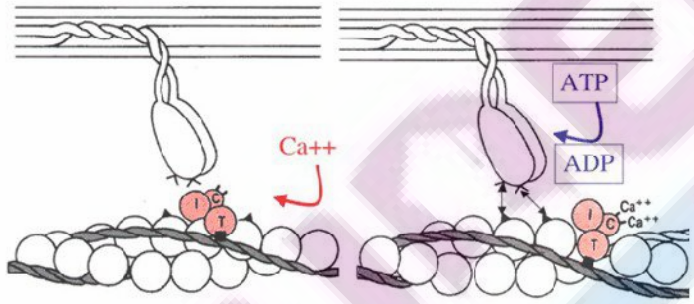
2- Les besoins de la contraction musculaire :

On procède à la dilacération de fibres musculaires dans le glycérol (alcool). Ce qui permet d'isoler les myofibrilles. Ces myofibrilles sont capables de conserver leur contractilité dans un milieu expérimental. Cette contractilité se manifeste par une sorte de tension. Le graphique ci-contre montre l'effet des ions Ca^{++} et de l'ATP sur la contraction des myofibrilles isolées.
Salyrgan : Une substance qui inhibe l'hydrolyse de l'ATP.



Un chélateur : Une substance qui fait précipiter les ions Ca^{++} qui ne reste plus en solution dans le milieu.

Document 2 : Mise en évidence de la nécessité de l'ATP et du Ca^{++} pour la contraction des myofibrilles.



Document 3 : Lorsque le muscle est au repos, la tropomyosine (liée à la troponine) cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine. Les ions calcium libres dans le sarcoplasme musculaire, se fixent sur la troponine qui change de conformation et déplace la tropomyosine, Cela libère le site de fixation de myosine.

- Interprétez les résultats de l'expérience du document 2.
- Que peut-on conclure d'après ces 2 documents ?

Réponses :

1- On observe que les myofibrilles se contractent rapidement après l'ajout de l'ATP et du $Ca2^{+}$, par contre après l'inhibition de l'hydrolyse de l'ATP par l'ajout du Salyrgan, il n'y a plus de contraction.

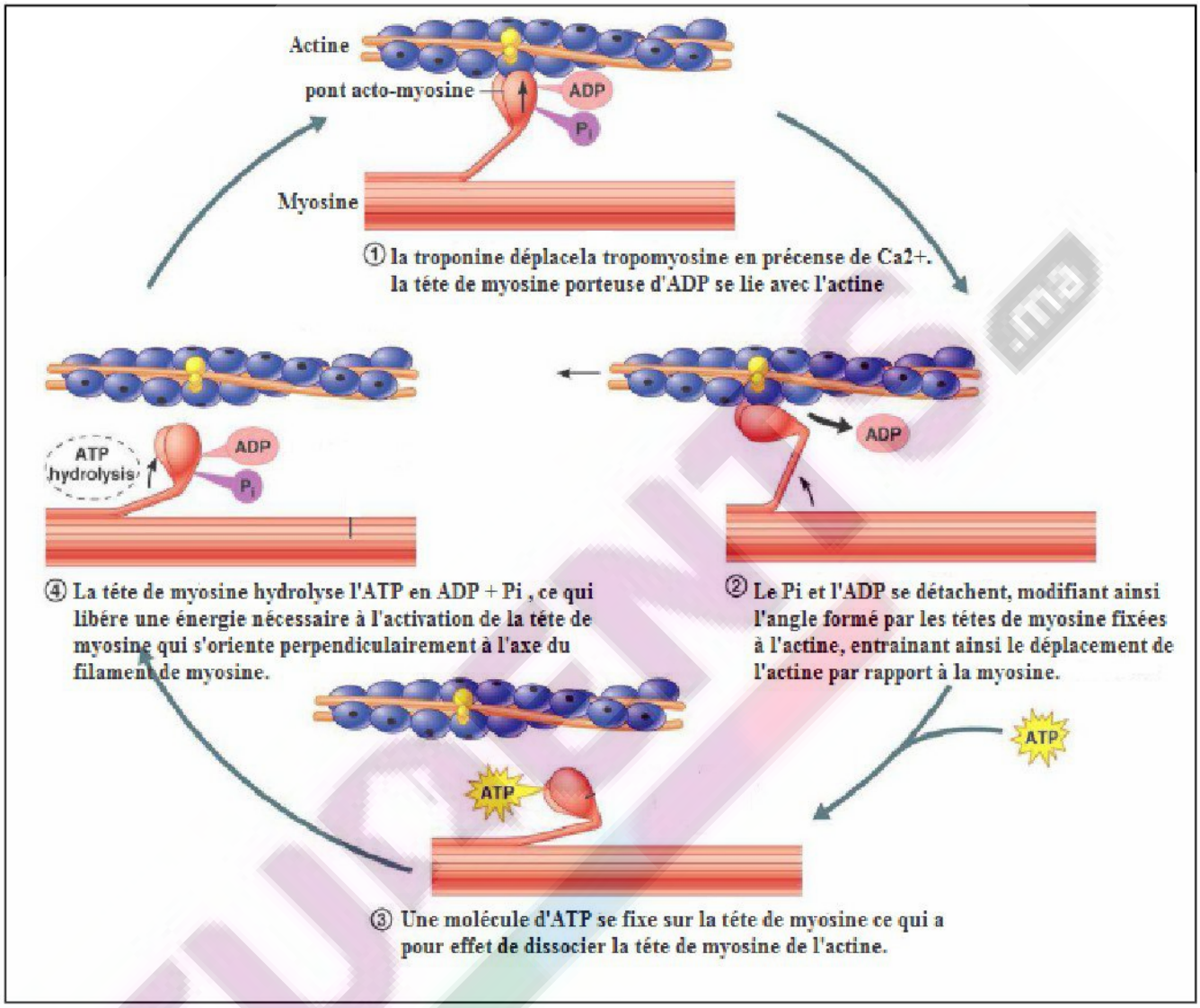
Aussi , lorsqu'on annule l'effet du $Ca2^{+}$, on n'obtient pas de contraction malgré la présence de l'ATP

2- Pour fonctionner, le muscle a besoin d'énergie sous forme d'ATP et des ions Ca2+, ces derniers permettent de libérer les sites de fixation de myosine sur les filaments d'actine, pour former les complexes d'actomyosine.

www.students.ma

www.students.ma

3. Mécanisme moléculaire de la contraction musculaire :



L'influx nerveux qui déclenche la contraction, provoque une augmentation de la quantité d'ions calcium à l'intérieur de la cellule. Ces ions permettent d'exposer les sites de liaison de la myosine sur les filaments d'actine. Dés que les sites de liaison de l'actine sont exposés, les événements suivants se succèdent rapidement.

Etape 1 : la tête de myosine porteuse d'ADP se lie avec l'actine et formation d'un complexe actine-myosine.

Etape 2 : le Pi et l'ADP se détachent, modifiant ainsi l'angle formé par les têtes de myosine fixées à l'actine (90° à 45°) et donc entrainant le déplacement de l'actine par rapport à la myosine.

Etape 3 : Une molécule d'ATP se fixe sur la tête de myosine ce qui a pour effet de dissocier la tête de myosine de l'actine.

www.students.ma

www.students.ma

Etape 4 : la tête de myosine hydrolyse l'ATP en ADP + Pi ce qui libère une énergie nécessaire à l'activation de la tête de myosine qui s'oriente perpendiculairement (90°) à l'axe du filament de myosine.

Tant que l'ATP est disponible et la concentration de $Ca2^+$ est élevée, le cycle se répète pour toutes les têtes de myosine, ce qui entraine le glissement des filaments d'actine et de myosine.

Après l'arrêt de la stimulation, les ions $Ca2^+$ retournent vers le réticulum sarcoplasmique et le muscle se relâche.

V. Renouvellement de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire :

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

2- Analyse et conclusion :

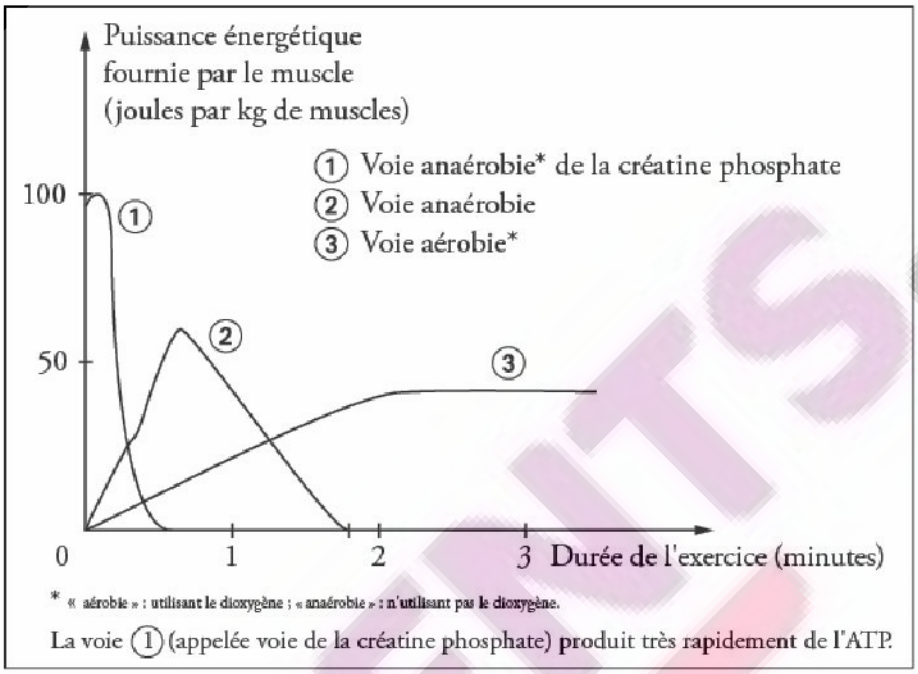
- **Expérience 1 :** on observe que le taux de glycogène diminue, celui de l'acide lactique a augmenté alors que le taux de l'ATP et celui de la phosphocréatine sont resté stables.
- Le taux stable de l'ATP dans cette expérience, malgré la consommation d'énergie pendant la contraction, montre qu'il y 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.
- 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 selon la réaction suivante :

www.students.ma

www.students.ma

- **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- Les voies métaboliques de régénération de l'ATP :



- **Voies rapides anaérobies :** avant 30 secondes, Régénération de l'ATP par la phosphocreatine (PC) et par l'ADP.

+ Réaction 1 : Par l'ADP sous l'effet de la myokinase (MK) :

+ Réaction 2 : Par la phosphocréatine (réaction accompagné par le dégagement de la chaleur initiale)

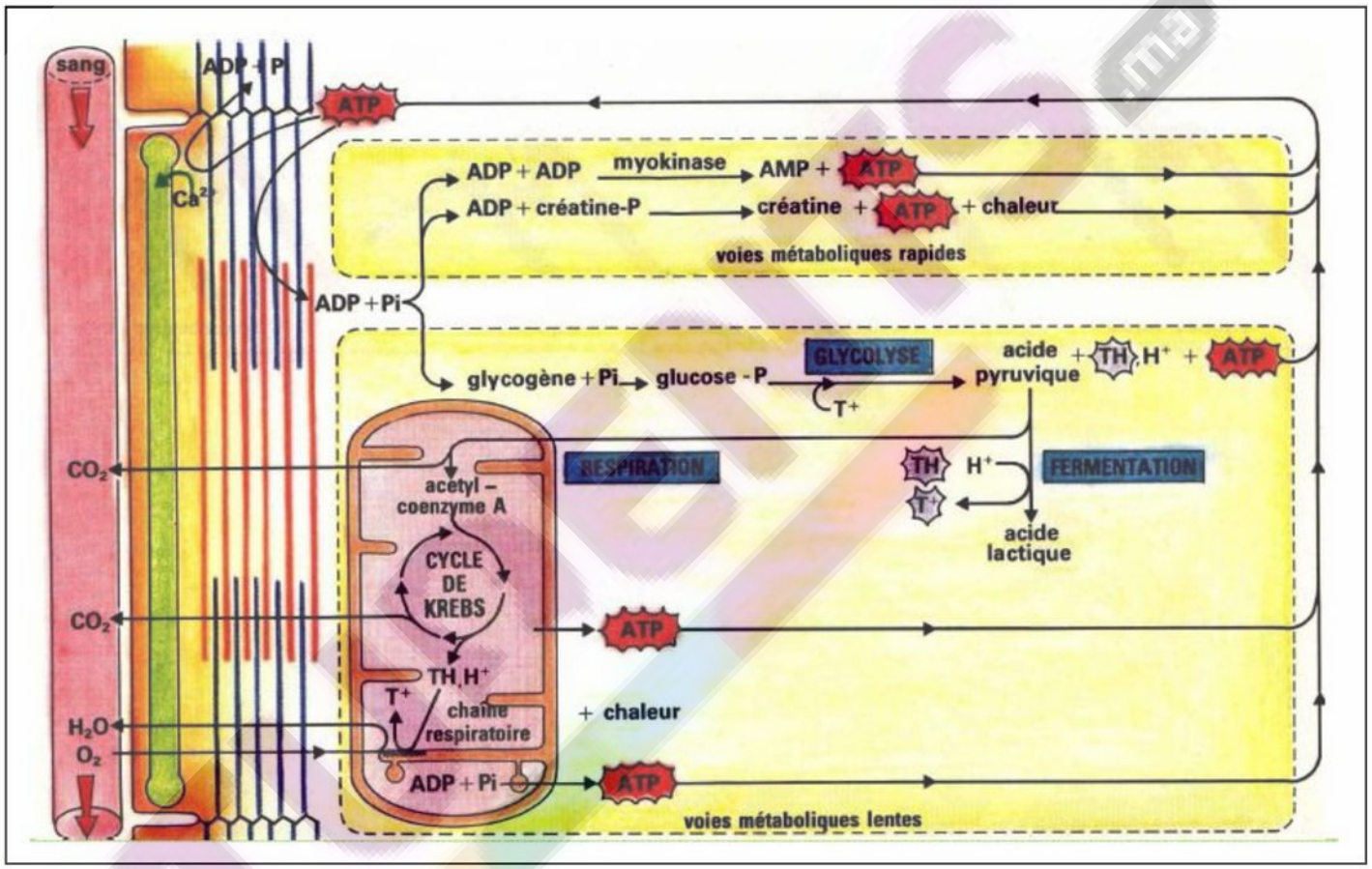
- **Voie métabolique moins rapide anaérobie lactique:** La fermentation lactique, qui intervient surtout lorsque l'intensité du travail musculaire est très élevée de sorte que la circulation sanguine n'assure plus les quantités suffisantes d'oxygène que nécessite la respiration. Le manque est comblé par la fermentation lactique.

www.students.ma

www.students.ma

- **Voie métabolique lente aérobie (chaleur retardé) :** C'est tout simplement la voie de la respiration cellulaire. Aprés épuisement de la phosphocréatine, la fermentation lactique prend le relai. Après quelque minutes d'effort, nécessaire à l'adaptation du système cardiovasculaire et respiratoire, les cellules musculaires, possédant de nombreuses mitochondries, sont correctement approvisionnées en dioxygène. L'ATP est alors principalement régénérée par la voie métabolique aérobie de la respiration cellulaire, qui permet de produire 36 molécules d'ATP par molécule de glucose oxydée.

VI. Bilan général :



www.students.ma