www.students.ma

UNITÉ 1

CONSOMMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FLUX D'ENERGIE

Table de matière

A. Analyse de quelques données....2
B. Quelques questions....2
II. Étude expérimentale de la contraction musculaire....2
A. Enregistrement des contractions musculaires....2
1 Protocol expérimental....2
2 Conditions d'excitabilité....3
B. Analyse de quelques myogrammes....3
1 Notion de secousse musculaire....3
2 La loi de recrutement....4
3 Notion de sommation des secousses....4
4 Notion de tétanos....5
III. Les phénomènes thermiques et chimiques accompagnant la contraction musculaire....5
A. Les phénomènes thermiques accompagnant la contraction musculaire....5
1 Rappel....5
2 Mesure de la quantité de chaleur produite lors de la contraction musculaire....5
B. Les phénomènes chimiques accompagnant la contraction musculaire....6
1 Quelle est la source d'énergie nécessaire à la contraction musculaire ?....6
2 Conclusion....8
III. Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique....8
A. Observation d'une coupe transversale d'un muscle strié squelettique....8
B. Étude de la structure des fibres musculaires....8
1 . Observations microscopiques....8
C. Étude de la structure moléculaire des myofilaments....10
1 Observations microscopiques....10
2 Constatations....10
IV. Mécanisme de la contraction musculaire....11
A. Comment se fait la contraction musculaire ?....11
B. Mise en évidence du rôle de l'ATP et du Ca^{++} dans la contraction musculaire....11
C. Quelques modèles explicatifs du mécanisme de la contraction musculaire....12
1 Premier modèle....12
2 Deuxième modèle....14
IV. La régénération de l'ATP....15
A. Exercices....15
1 Exercice 1....15
2 Exercice 2....16
B. Conclusion : les voies de la régénération de l'ATP....17
1 La voie rapide anaérobie ou voie anaérobie alactique....17
2 La voie lente anaérobie ou voie anaérobie lactique....17
3 La voie lente aérobie....18

www.students.ma

www.students.ma

Chapitre 1

Rôle du muscle strié squelettique dans la conversion de l'énergie.

(13h)

Introduction

A. Analyse de quelques données *(doc.1)*

Document 1:

- Grace aux réactions métaboliques de la respiration et la fermentation, les cellules libèrent l'énergie contenue dans les métabolites organiques consommés et convertissent cette énergie en ATP.
- Les cellules utilisent l'énergie de l'ATP dans la réalisation d'activités diverses. Parmi ces activités, il y a le mouvement mécanique qui résulte de la contraction des muscles striés squelettiques. Ces derniers qui sont reliés aux os du squelette permettent aussi le maintien de la posture et la stabilisation de l'articulation.
- Le but d'une contraction musculaire est aussi la production d'une force (tension musculaire) qui sera opposée à une force externe (la charge). On distingue deux types de contractions musculaires :
  - ✓ La contraction isométrique : la tension du muscle augmente alors que sa longueur reste constante.
  - ✓ La contraction isotonique : le muscle se raccourcit mais la tension qu'il développe reste constante.
- Au cours de la contraction musculaire, l'énergie chimique de l'ATP est convertie en énergie mécanique.

B. Quelques questions

- ✓ Quel est le mécanisme de la contraction musculaire et qui en sont les structures cellulaires responsables ?
- ✓ Comment l'énergie chimique de l'ATP est convertie en énergie mécanique au cours de la contraction musculaire ?

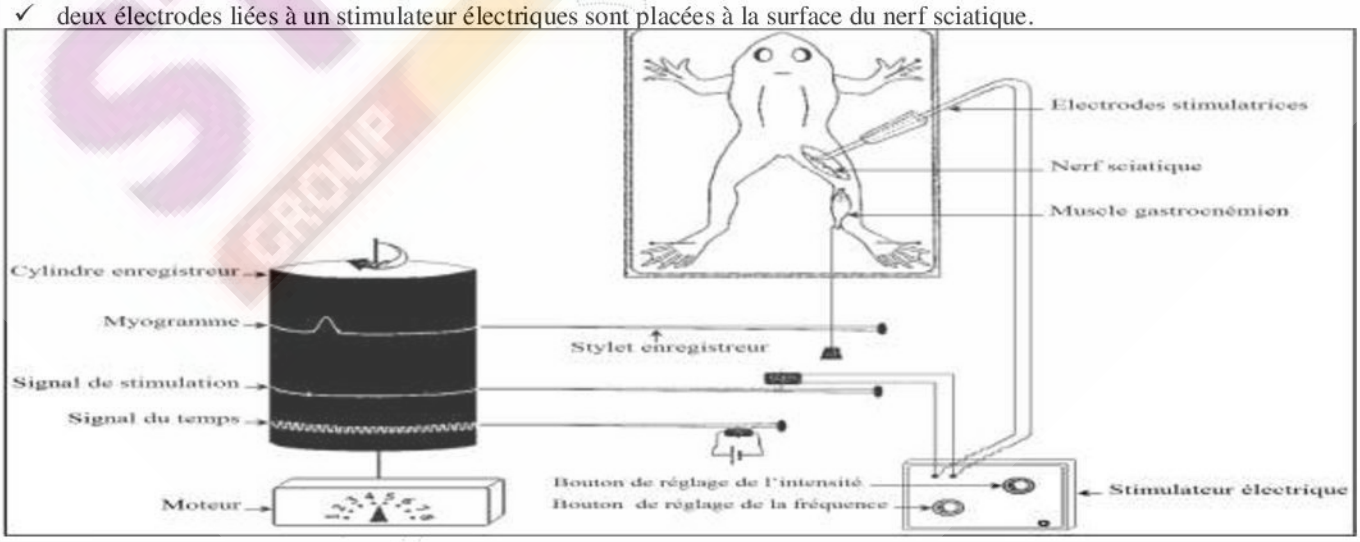
I. Étude expérimentale de la contraction musculaire

A. Enregistrement des contractions musculaires

1 Protocol expérimental *(doc.2)*

Document 2:

- La figure ci-dessous représente un exemple du matériel utilisé pour l'étude expérimental de la contraction musculaire. On soumet une grenouille aux manipulations suivantes :
- ✓ décérébration (destruction du cerveau) et démédullation (destruction de la moelle épinière) pour inhiber les mouvements volontaires et les réflexes;
- ✓ fixation sur une planchette en bois ;
- ✓ dégagement par dissection du muscle gastrocnémien et du nerf sciatique qui l'innerve au niveau de l'un des membres inférieurs ;
- ✓ le muscle gastrocnémien est détaché du tendon puis relié à un myographe constitué essentiellement d'un stylet et d'un cylindre ;
- ✓ deux électrodes liées à un stimulateur électriques sont placées à la surface du nerf sciatique.



www.students.ma

www.students.ma

2 Conditions d'excitabilité

On applique sur le nerf sciatique plusieurs stimulations dont l'intensité augmente progressivement ; lorsque l'intensité d atteint une valeur bien déterminée appelée rhéobase, le muscle gastrocnémien répond par des contractions qui sont enregistrées sur le cylindre du myographe sous forme de tracés appelés myogrammes.

Constatations :

Le muscle se caractérise donc par son excitabilité et sa contractilité.

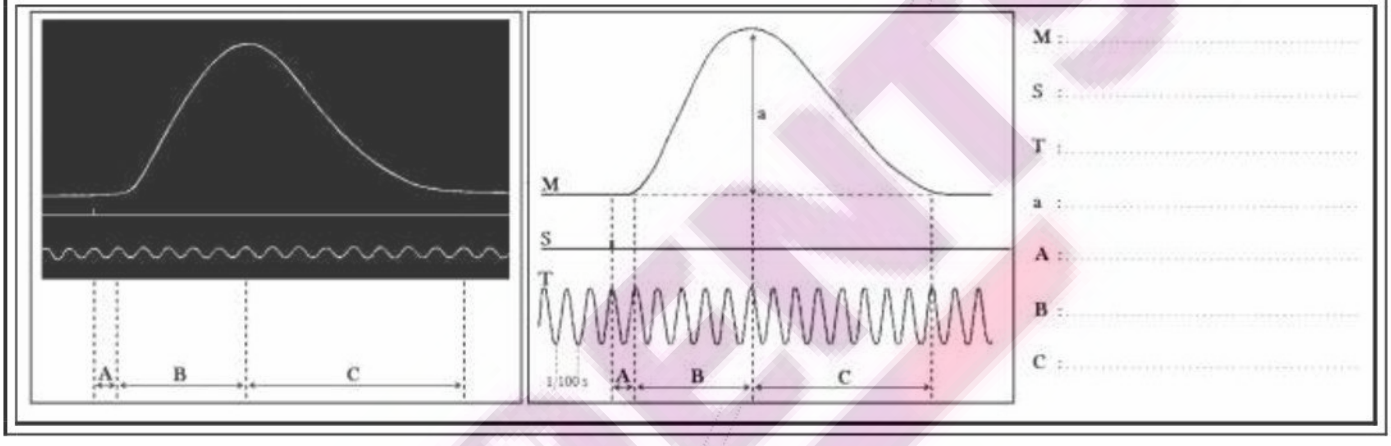
la rhéobase (appelée aussi seuil d'excitation ou intensité liminaire) est l'intensité d'excitation minimale qui donne une réponse musculaire. les intensités inférieures à la rhéobase (intensités infraliminaires) sont inefficaces (elles ne provoquent pas de contraction musculaire), alors que les intensités supérieures à la rhéobase (intensités supraliminaires) sont inefficaces.

Remarque : On peut obtenir une contraction musculaire par excitation mécanique, chimique, thermique ou électrique.

B. Analyse de quelques myogrammes

1 Notion de secousse musculaire *(doc.3)*

Document 3:



➢ Le myogramme du document 3 représente la réponse d'un muscle à une excitation unique et efficace. Il s'agit de ce qu'on appelle une secousse musculaire isolée, celle-ci est divisée en trois phases :

✓ Phase de latence : temps qui s'écoule entre l'instant de la stimulation et le début de la réponse musculaire ;

✓ Phase de contraction: elle se caractérise par raccourcissement du muscle ou l'augmentation de sa tension ;

✓ Phase de relâchement: le muscle récupère ses dimensions initiales.

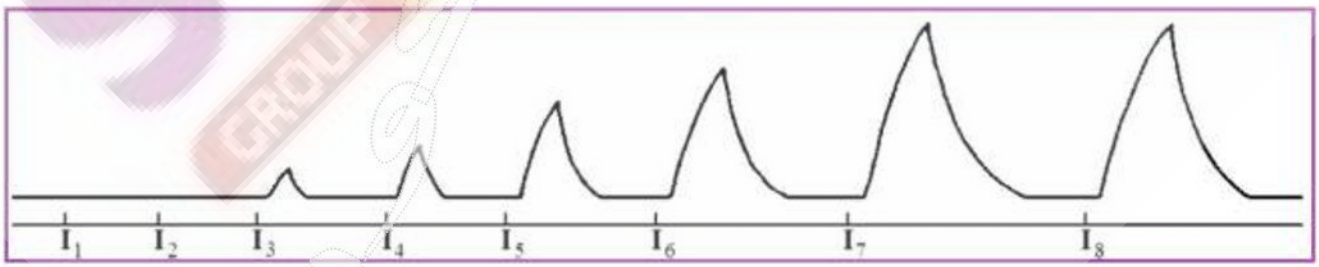
2 La loi de recrutement

➢ *Exercice (doc.4)*

Document 4:

❖ La figure ci-dessous représente le schéma d'un myogramme obtenu à la suite de l'exécution sur un muscle de stimulations successives, éloignées et d'intensités croissantes (I1 < I2 < I3 …. < I8).

1) Analysez et interprétez le myogramme obtenu sachant que le muscle est constitué de cellules contractiles qui n'ont pas la même rhéobase.



➢ *Éléments de réponse*

➢ Les intensités I_1et I_2 sont inefficaces, elles sont donc infraliminaires.

➢ À partir de I_3, on obtient une réponse musculaire sous forme de secousse musculaire. On déduit que la rhéobase du muscle étudié est comprise entre I_2 et I_3 (I_2 < rhéobase ≤ I_3).

www.students.ma

www.students.ma

➢ De I_3 à I_7, l'amplitude de la réponse musculaire augmente progressivement en fonction de l'intensité de la stimulation.

✓ *Explication* : augmentation de l'intensité de la stimulation ⟶ augmentation du nombre de cellules musculaires qui sont recrutées pour la contraction ⟶ augmentation de l'amplitude de la réponse musculaire

Ce phénomène s'appelle la loi de recrutement.

➢ À partir de I_7, on obtient une contraction avec une amplitude maximale qui reste constante malgré l'augmentation de de l'intensité de la stimulation : toutes les fibres du muscles ont été recrutées, elles se contractent toutes.

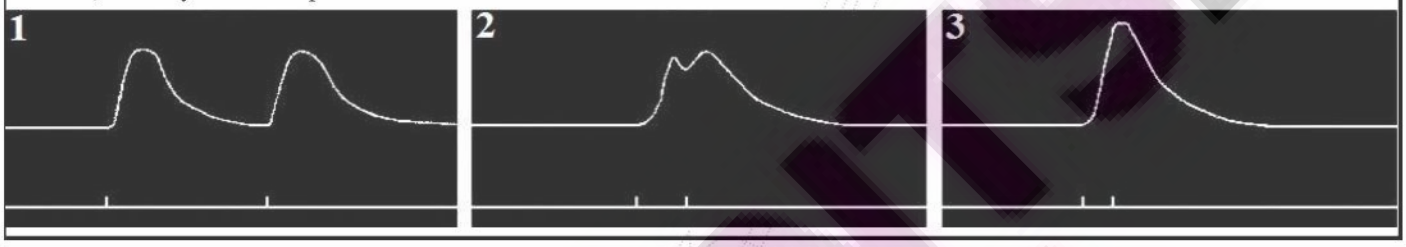
3 Notion de sommation des secousses

➢ *Exercice (doc.5)*

Document 5:

❖ On soumet un muscle à deux stimulations successives de même intensité supraliminaire. On répète la manipulation en faisant à chaque foi diminuer l'intervalle de temps qui sépare les deux stimulations. Les myogrammes ci-dessous présentent les résultats de cette expérience.

1) Analysez et interprétez les résultats obtenus.



➢ *Éléments de réponse*

➢ Lorsqu'on soumet un muscle à deux stimulations successives de même intensité, l'aspect du myogramme obtenu dépond de l'intervalle de temps qui sépare les deux stimulations :

- ✓ Myogramme 1 : les deux stimulations sont suffisamment éloignées, on obtient deux secousses identiques (même amplitude, même durée)
- ✓ Myogramme 2 : la deuxième stimulation est appliquée pendant la phase de relâchement de la première réponse, elle donne une deuxième secousse dont l'amplitude est supérieure à la première. Il y a eu dans ce cas une fusion incomplète des deux réponses musculaires.
- ✓ Myogramme 3 : la deuxième stimulation survient pendant la phase de contraction de la première réponse, on obtient une réponse d'amplitude supérieure à celle d'une secousse isolée, il s'agit en réalité de deux secousses qui ont fusionné complètement.
- ✓ Les myogrammes 1 et 2 mettent en évidence le phénomène de la sommation des secousses : la tension générée par la deuxième secousse s'ajoute à celle produite par la première secousse.

4 Notion de tétanos

➢ *Exercice (doc.6)*

➢ *Éléments de réponse*

➢ Le tracé de la figure 1 montre au début une augmentation de l'amplitude, suivie d'une suite d'oscillations successives puis un relâchement après l'arrêt des stimulations.

Le myogramme de la figure 2 se caractérise par une augmentation de l'amplitude, suivie d'un plateau rectiligne puis un relâchement après l'arrêt des stimulations.

➢ Dans les deux cas, on remarque que le muscle reste en contraction tant qu'on l'excite, on dit que le muscle est en *tétanos*. On distingue deux types de tétanos :

- ✓ *le tétanos* imparfait (figure 1): succession de secousses musculaires qui fusionnent incomplètement, car chacune d'elle survient au cours de la phase de relâchement de celle qui la précède ;
- ✓ *le tétanos* parfait (figure 2): succession de secousses musculaires qui fusionnent complètement, car chacune d'elle survient au cours de la phase de contraction de celle qui la précède.

www.students.ma

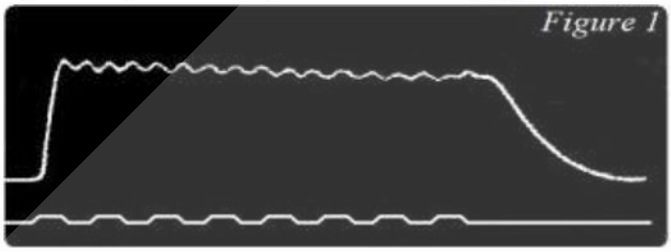
www.students.ma

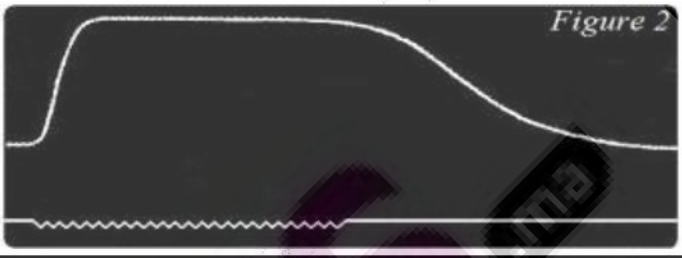
Document 6:

❖ On applique sur un muscle une série de stimulations d'intensité constante mais dont on fait varier la fréquence :

- ➢ Pour une fréquence de 15 stimulations /s, on obtient le myogramme de la figure 1;
- ➢ Pour une fréquence de 30 stimulations /s, on obtient le myogramme de la figure 2.

1) Analysez et interprétez les deux myogrammes obtenus.





II. Les phénomènes thermiques et chimiques accompagnant la contraction musculaire

A. Les phénomènes thermiques accompagnant la contraction musculaire

1 Rappel

❖ Lors d'un effort musculaire, la température corporelle augmente. Il y a alors évacuation de l'excédent par sudation (augmentation de la perte de chaleur).

❖ Le frisson est un mécanisme de réchauffement.

- ➢ *Constatation :* Tout muscle qui se contracte produit de la chaleur.

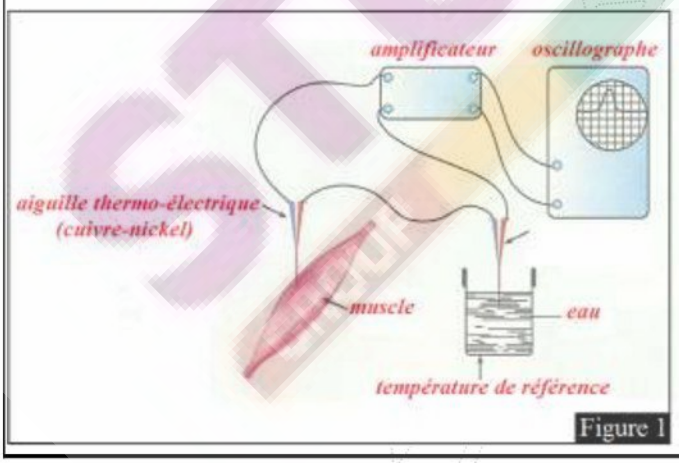
2 Mesure de la quantité de chaleur produite lors de la contraction musculaire

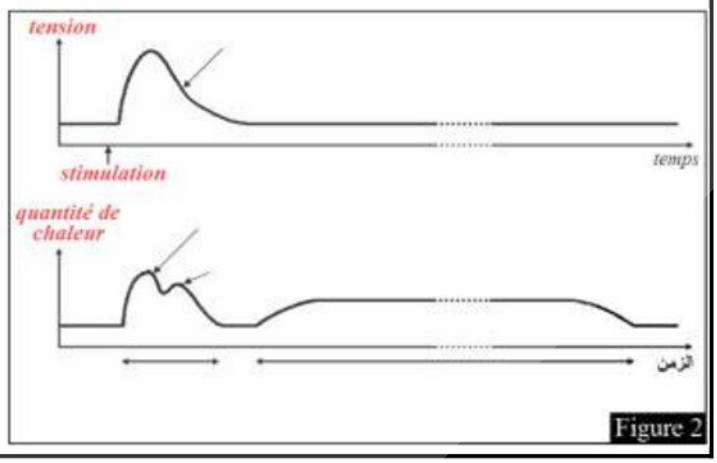
2.1. Méthode de mesure (doc.7)

Document 7:

❖ Pour mesurer la quantité de chaleur produite lors d'une contraction musculaire, ont utilisé la *thermopile* (figure 1). C'est un instrument qui comporte deux aiguilles thermo-électriques, formée chacune de deux métaux différents (cuivre ou or et nickel). L'une des aiguilles est introduite dans le muscle, l'autre est maintenue à une température de référence. Lorsque le muscle se contracte, une différence de température apparait entre les deux aiguilles et engendre un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à la température du muscle. Ce courant est traduit sous forme de courbes qui apparaissent sur l'écran d'un oscillographe (figure 2).

❖ On peut ainsi apprécier des variations de température de l'ordre de quelques microdegrés qui s'effectuent sur des durées de quelques millisecondes.





2.2. Analyse des résultats (fig.2- doc.7)

❖ Toute contraction musculaire s'accompagne d'un dégagement de la chaleur qui se divise en deux parties : la *chaleur initiale* et la *chaleur retardée.*

✓ La chaleur initiale est libérée au cours de la secousse musculaire pendant un temps très court (quelques fractions de seconde). Cette chaleur se divise elle-même en deux parties qui sont la chaleur de contraction et la

www.students.ma

www.students.ma

chaleur de relâchement.

✓ La chaleur retardée est dégagée après la phase de relâchement, quand le muscle est au repos, pendant une durée importante (quelques minutes).

B. Les phénomènes chimiques accompagnant la contraction musculaire

1 Quelle est la source d'énergie nécessaire à la contraction musculaire ?

➢ *Exercice (doc.8)*

Document 8:

❖ Pour déterminer la source de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire, on propose l'étude des résultats de quelques expériences.

➢ ***Première expérience*** : Au début du vingtième siècle, les physiologistes CHAUVEAU et KAUFMAN ont analysé le sang entrant et le sang sortant du muscle releveur de la lèvre supérieure d'un cheval. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

➢ ***Deuxième expérience*** : Chez une personne de 70 kg qui réalise un exercice musculaire dont l'intensité croit progressivement, on mesure la consommation d'O_2 et la concentration de l'acide lactique dans le sang en fonction de l'intensité de l'effort musculaire. Le tableau 2 traduit les résultats de ces mesures.

1. À partir de l'analyse des données des tableaux 1 et 2, déterminez pour chaque expérience, le ou les origines de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

➢ ***Troisième expérience*** : Le tableau 3 présente les conditions expérimentales et les résultats de manipulations réalisées par les chercheurs HOPKINS et FEITCHER sur le muscle gastrocnémien d'une grenouille.

2. Que constatez-vous à partir de l'analyse des résultats de l'expérience de HOPKINS et FEITCHER ?

Tableau 1

	En une heure pour chaque kg de muscle	
	Muscle au repos	Muscle en activité
Volume de sang traversant le muscle	12,220 ℓ	56,325 ℓ
O_2 utilisé	0,307 ℓ	5,207 ℓ
CO_2 rejeté	0,220 ℓ	5,950 ℓ
Glucose utilisé	2,042 g	8,430 g
Lipides utilisés	0 g	0 g
Protides utilisés	0 g	0 g

Tableau 2

Intensité de l'effort musculaire en kJ/min	Consommation d'O_2 en ℓ/min	concentration de l'acide lactique en g/ℓ
44	2,17	Traces
52	2,8	Traces
58,5	3,01	Traces
68	3,04	1,985
79,5	3,04	13,43
92	3,04	26,8
101	3,04	37,66

Tableau 3	Conditions expérimentales	Résultats
Manipulation 1	Stimulations supraliminaires du muscle placé en milieu anaérobie.	Le muscle se contracte et dégage uniquement la chaleur initiale. Il accumule l'acide lactique et se fatigue rapidement.
Manipulation 2	Stimulations supraliminaires du muscle placé en milieu anaérobie contenant : - une faible quantité d'ATP ; - l'acide monoiodoacétique qui bloque la production de l'acide lactique.	Le muscle se contracte et libère uniquement la chaleur initiale pendant une courte durée, puis ne répond plus aux excitations.

Éléments de réponse

1. *Analyse des données du tableau 1* : En passant de l'état de repos à l'état activité musculaire, on remarque :

- ✓ une augmentation considérable du volume de sang traversant le muscle ;
- ✓ une consommation très importante d'O_2 et du glucose ;
- ✓ un dégagement très important du CO_2.

❖ On déduit que le muscle étudié utilise la voie de la respiration pour obtenir l'énergie nécessaire à la contraction.

❖ *Analyse des données du tableau 2 :*

✓ Pour des intensités allant de 44 à 68 kJ/ min : la consommation d'O_2 augmente progressivement de 2,17 à 3,04 ℓ/min, alors que la concentration de l'acide lactique est presque nulle.

www.students.ma

www.students.ma

- *Constatation:* le muscle utilise la respiration comme voie métabolique pour obtenir l'énergie nécessaire à la contraction.
  - ✓ À partir de l'intensité 68 kJ/ min : la consommation d'O_2 reste constante à la valeur maximale 3,04 ℓ/min.
  - ✓ L'acide lactique apparait et sa concentration augmente progressivement en fonction de l'intensité de l'effort.
- *Constatation* : le muscle utilise la fermentation lactique en plus de la respiration pour avoir l'énergie nécessaire, car l'énergie fournie par la respiration est devenue insuffisante pour l'effort musculaire très intense.
- *Analyse des résultats de la manipulation 1 :*
  - ✓ Le muscle étudié se contracte en milieu anaérobie et produit l'acide lactique. On déduit que ce muscle utilise la fermentation lactique pour avoir l'énergie nécessaire à la contraction.
  - ✓ En milieu anaérobie (absence d'O_2), le muscle qui se contracte produit la chaleur initiale et ne dégage pas la chaleur retardée. On déduit que la chaleur initiale est liée à des réactions chimiques exothermiques anaérobies, alors que la chaleur retardée dépond de réactions chimiques exothermiques aérobies.
  - ✓ La fatigue rapide du muscle s'explique par le faible rendement de la fermentation (2ATP) et l'accumulation de l'acide lactique.
- *Analyse des résultats de la manipulation 2 :*

En absence de la respiration et de la fermentation lactique, le muscle peut se contracter en présence de l'ATP. Celle-ci constitue donc, la source directe de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire. Après épuisement de l'ATP, le muscle ne répond plus aux excitations.

2 Conclusion

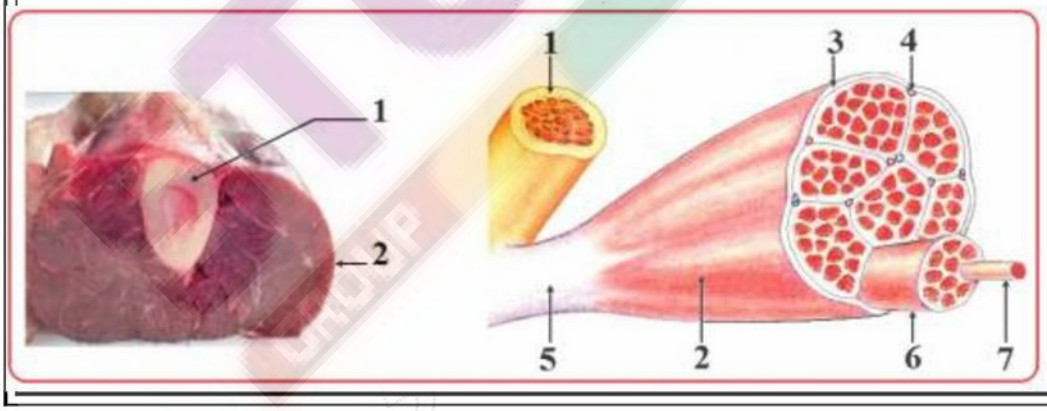
❖ L'activité musculaire nécessite une dépense d'énergie. Pour se procurer l'énergie nécessaire à la contraction, les cellules musculaires utilisent la respiration, ou la fermentation lactique (ou les deux à la foi).
L'utilisation de la respiration cellulaire au cours de l'effort musculaire se traduit par une augmentation de la consommation d'O_2 et du glucose, ainsi que par un dégagement très important du CO_2.
Quant à la fermentation lactique, elle se manifeste par une augmentation de la consommation du glucose et de la production de l'acide lactique.

- *Remarque :* le glucose consommé par le muscle pour se procurer l'énergie nécessaire à la contraction provient du sang d'une part, et de la dégradation du glycogène musculaire d'autre part (le glycogène est un polysaccharide dont la formule globale est $(C_6H_{10}O_5)_n$). C'est pour cela que les réserves musculaires en glycogène diminuent lors de l'activité musculaire.

III. Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique.

A. Observation d'une coupe transversale d'un muscle strié squelettique *(doc.9)*

Document 9:



1 : os
2 : muscle
3 : tissu conjonctif
4 : vaisseau sanguin
5 : tendon
6 : faisceau de fibres
7 : fibre musculaire

❖ Les muscles striés squelettiques (muscles reliés aux os du squelette par des tendons) sont constitués essentiellement d'éléments fins et longs appelés les fibres musculaires. Ces derniers sont organisés en faisceaux parallèles sur toute la longueur du muscle.

B. B. Étude de la structure des fibres musculaires

1 1. Observations microscopiques

1.1. Observations au microscope optique *(doc.10)*

www.students.ma

www.students.ma

Document 10:

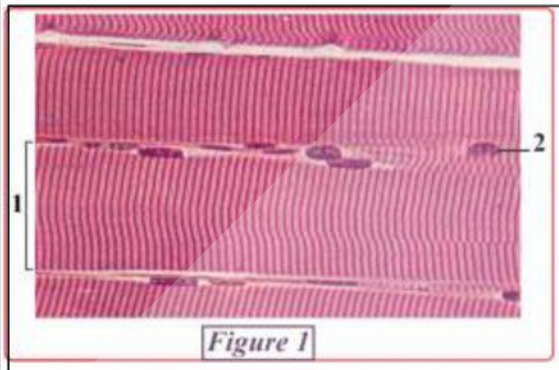


Figure 1

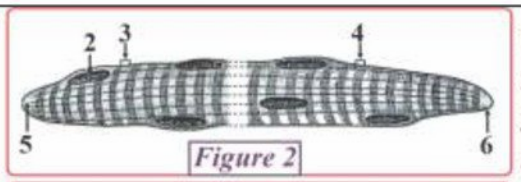


Figure 2

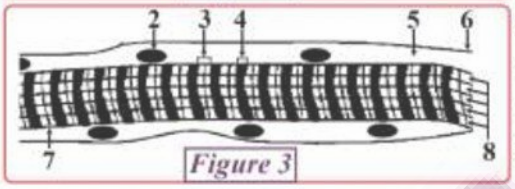


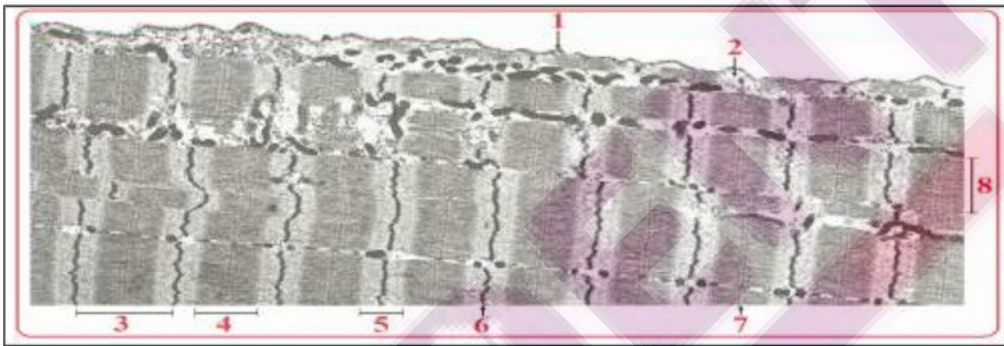
Figure 3

1: fibre musculaire
2: noyau
3: bande claire (bande I)
4: bande sombre (bande A)
5: sarcoplasme
6: sarcolemme
7: strie Z
8: myofibrilles

- Figure 1: coupe longitudinale d'un muscle strié observée au microscope optique.
- Figure 2: schéma tridimensionnel d'une fibre musculaire.
- Figure 3: schéma d'une coupe longitudinale d'une partie d'une fibre musculaire.

1.2. Observations au microscope électronique (documents 11,12 et 13)

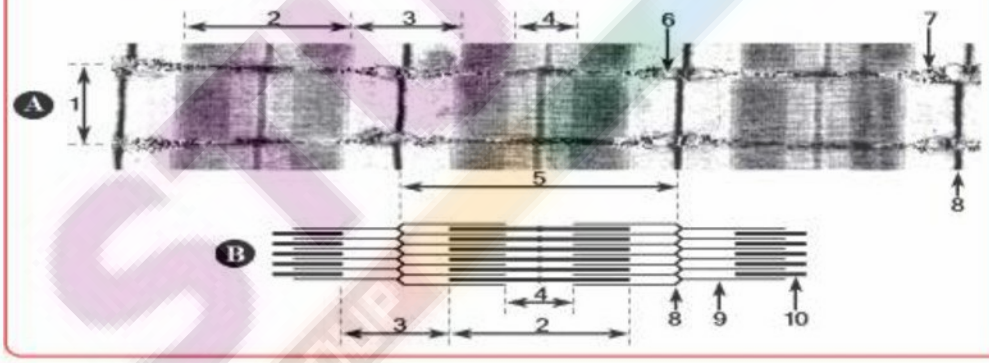
Document 11:



1: sarcolemme
2: sarcoplasme
3: sarcomère
4: bande sombre
5: bande claire
6: strie Z
7: bande H
8: myofibrille

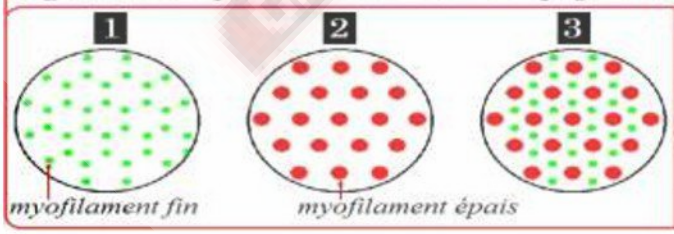
Document 12:

Figure 1: coupes longitudinales d'une myofibrille



A : photo microscopique
B : schéma explicatif
1 : myofibrille
2 : bande sombre
3 : bande claire
4 : bande H
5 : sarcomère
6 : mitochondrie
7 : glycogène
8 : strie Z
9 : myofilament épais
10 : myofilament fin

Figure 2: coupes transversles de myofibrilles

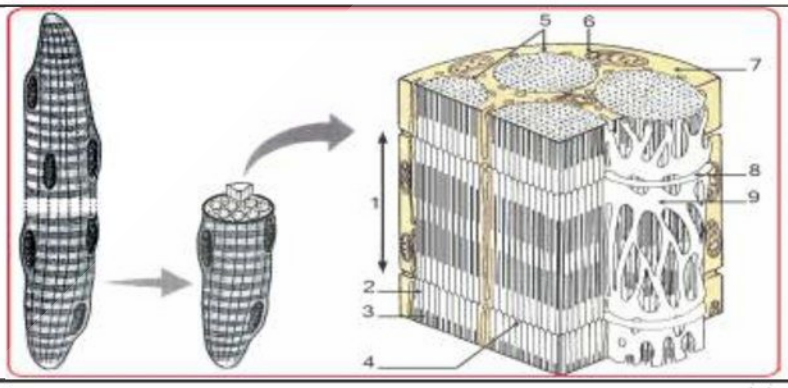


1 : coupe transversale au niveau de la bande claire
2 : coupe transversale au niveau de la bande H
3 : coupe transversale au niveau de la bande sombre hors de la bande H

www.students.ma

www.students.ma

Document 13:



1.3. Constatations

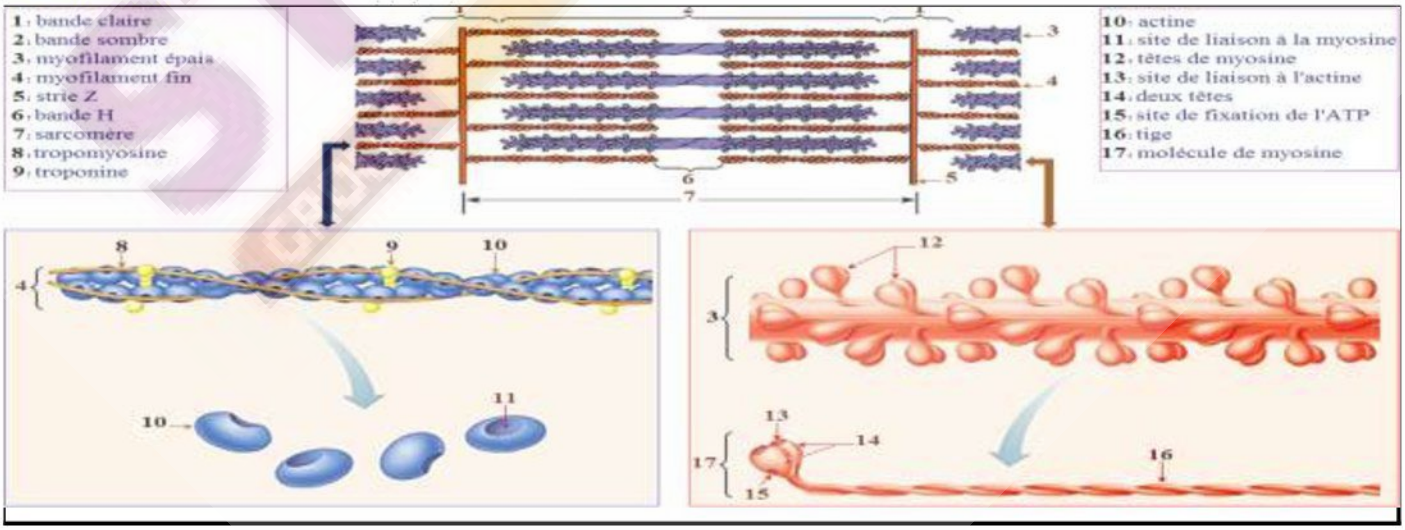
❖ La fibre musculaire (appelée aussi myocyte) est une cellule qui a la forme d'un cylindre allongé et qui présente un aspect strié (striation transversale et longitudinale).
❖ Le diamètre d'une fibre musculaire varie entre 10 et 200 µm alors que sa longueur peut atteindre plusieurs cm.
❖ La cellule musculaire est enveloppée par une membrane cytoplasmique appelée sarcolemme. Son cytoplasme dit sarcoplasme est occupé essentiellement par ce qu'on appelle les myofibrilles : organites cylindriques, parallèles entre eux et avec l'axe longitudinal de la fibre musculaire, c'est ce qui explique la striation longitudinale de la fibre musculaire.
❖ Le sarcoplasme contient aussi des centaines de noyaux, des mitochondries, du glycogène ainsi qu'un réticulum qui entoure les myofibrilles et qu'on appelle le réticulum sarcoplasmique.
❖ Les myofibrilles montrent une alternance entre des bandes transversales claires (bandes I), et des bandes transversales sombres (bande A), c'est ce qui explique la striation transversale de la fibre musculaire.
❖ Au milieu de chaque bande claire, on trouve une rayure nommée strie Z.
❖ Le milieu de chaque bande sombre montre une zone moins sombre appelée bande H.
❖ La zone de la myofibrille comprise entre deux stries Z s'appelle le sarcomère, chaque myofibrille est donc formée d'une succession de sarcomères, on dit que la sarcomère est l'unité structurale de la fibre musculaire.
❖ Les sarcomères sont composés de filaments longitudinaux appelés myofilaments. On distingue deux types de ces myofilaments:

- Les myofilaments épais ou myofilaments de myosine, ils se localisent tout au long de la bande sombre ;
- Les myofilaments fins ou myofilaments d'actine, on les trouve dans la bande claire et aussi dans la bande sombre mais hors de la zone H.

C. Étude de la structure moléculaire des myofilaments

1 Observations microscopiques *(doc.14)*

Document 14:



www.students.ma

www.students.ma

2 Constatations

❖ Les myofilaments qui forment les sarcomères sont constitués essentiellement de molécules de nature protéique :
les myofilaments fins sont formés de trois types de protéines qui sont l'actine, la tropomyosine et la troponine ;
les myofilaments épais sont constitués d'une seule espèce de protéine qui est la myosine.

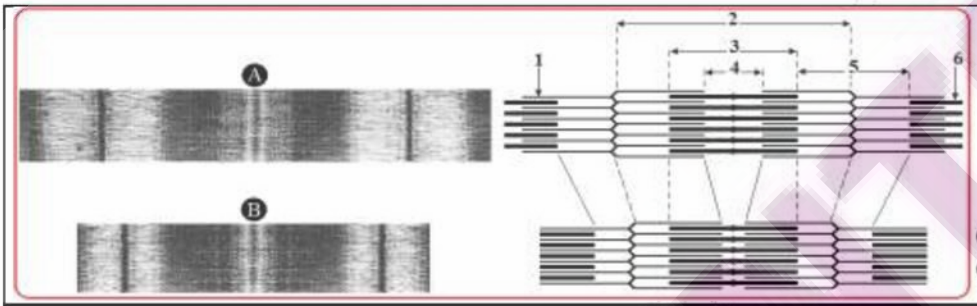
❖ Les molécules d'actine possèdent des sites de liaison à la myosine. Au repos, ces sites sont masqués par les molécules de tropomyosine.

❖ La molécule de myosine est formée d'une tige et deux têtes globulaires, chaque tête possède un site de liaison à l'actine et un site de fixation d'une molécule d'ATP.

IV. Mécanisme de la contraction musculaire.

A. Comment se fait la contraction musculaire ? *(doc.15)*

Document 15:



1: *myofilament fin*
2: *sarcomère*
3: *bande sombre*
4: *bande H*
5: *bande claire*
6: *myofilament épais*
A : *myofilament au repos*
B : *myofilament en contraction*

❖ La figure A représente une myofibrille au repos alors que la figure B représente la même myofibrille en contraction. En comparent les deux figures, on remarque au cours de la contraction :
- ✓ un raccourcissement du sarcomère, de la bande claire et de la bande H ;
- ✓ la longueur de la bande sombre et celle des myofilaments reste constante.

❖ *Constatation :* la contraction musculaire est un phénomène mécanique qui se déroule au niveau de tous les sarcomères, elle est due à un glissement des myofilaments fins entre les myofilaments épais vers le centre du sarcomère. C'est pour cela que le sarcomère est considéré comme l'unité fonctionnelle de la fibre musculaire

B. Mise en évidence du rôle de l'ATP et du Ca^{++} dans la contraction musculaire

➢ *Exercice* ***(doc.16)***

➢ *Éléments de réponse*

1. Avant l'addition de l'ATP et Ca^{++}, la tension est nulle → pas de contraction de la myofibrille.

✓ L'addition de l'ATP et Ca^{++} provoque une augmentation rapide et importante de la tension → la myofibrille se contracte.

✓ Lorsqu'on ajoute Salyrgan ou l'Inhibiteur, la tension diminue rapidement et s'annule → arrêt de la contraction.

❖ *Constatation* : L'ATP et Ca^{++} sont indispensables à la contraction musculaire.

2. **Milieu 1**: Les myofilaments d'actine seuls n'ont aucune action sur l'ATP.

✓ **Milieu 2**: Les myofilaments de myosine permettent une faible hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi. En effet chaque tête de la molécule de myosine possède un site actif qui fixe une molécule d'ATP et joue le rôle d'ATPase.

✓ ***Milieu* 3**: Les complexes actomyosine activent fortement l'hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi. L'énergie qui résulte de cette hydrolyse est utilisée pour le glissement des myofilaments d'actine sur les myofilaments de myosine.

❖ *Constatation:* - L'énergie nécessaire à la contraction musculaire provient de l'hydrolyse de l'ATP.
- La formation des complexes actomyosine est indispensable à la contraction musculaire.

3. ***Absence* de *Ca*$^{++}$** → les molécules de tropomyosine masquent les sites de liaison entre l'actine et la myosine → pas de formation des complexes actomyosine → pas de glissement des molécules d'actine sur les molécules de myosine.

✓ **Présence *de Ca*$^{++}$** → fixation de Ca^{++} sur les molécules de troponine → translocation des molécules de troponine et de tropomyosine → démasquage des sites de liaison entre l'actine et la myosine → formation des complexes actomyosine → glissement des molécules d'actine sur les molécules de myosine → contraction.

❖ *Constatation*: le rôle des ions Ca^{++} dans la contraction musculaire est la libération des sites de liaison entre l'actine et la myosine, ce qui permet ensuite la formation des complexes actomyosine.

www.students.ma

www.students.ma

❖ *Remarque*: les ions Ca^{++} nécessaires à la contraction musculaire proviennent du réticulum sarcoplasmique.

Document 16:

❖ Pour mettre en évidence le rôle de certains éléments dans la contraction musculaire, on propose les données suivantes :

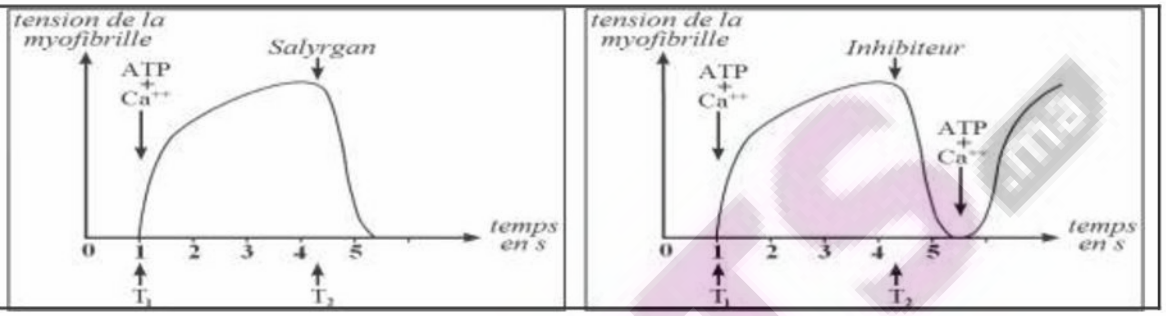
➢ *Première donnée :* On place une myofibrille isolée dans un milieu physiologique sans Ca^{++} et sans ATP. On mesure ensuite la tension musculaire développée par la myofibrille dans les conditions suivantes:

✓ Addition en T_1 de Ca^{++} et de l'ATP, puis addition en T_2 de Salyrgan : substance inhibant l'hydrolyse de l'ATP.

✓ Addition en T_1 de Ca^{++} et de l'ATP, puis addition en T_2 d'un inhibiteur: substance qui se lie à Ca^{++} et empêche son action.

❖ Les résultats des mesures de la tension musculaire sont traduits par les graphes de la figure 1.

Figure 1



1. Décrivez l'évolution de la tension développée par la myofibrille dans les différentes conditions. Que constatez-vous?

➢ *Deuxième donnée :* Pour mettre en évidence la relation entre la molécule d'ATP et certains constituants de la fibre musculaire, on propose les données du tableau 1 suivant qui représentent les conditions et les résultats d'expériences réalisées sur certains des myofilaments.

Tableau 1

Milieux expérimentaux	Constituants du milieu	
	Début de l'expérience	Fin de l'expérience
Milieu 1	myofilaments d'actine + ATP + Ca^{++}	myofilaments d'actine + ATP + Ca^{++}
Milieu 2	myofilaments de myosine + ATP + Ca^{++}	myofilaments de myosine + ATP + Ca^{++} + une faible quantité d'ADP et de Pi
Milieu 3	myofilaments de myosine + myofilaments d'actine + ATP + Ca^{++}	complexes actomyosine + Ca^{++} + une grande quantité d'ADP et de Pi

Remarque : Dans le milieu 3, les complexes actomyosine résultent de la liaison entre les myofilaments d'actine et les myofilaments de myosine (fixation des têtes des molécules de myosine sur les molécules d'actine). Après la formation de ces complexes, on note un glissement des myofilaments d'actine sur les myofilaments de myosine (contraction musculaire).

2. Que constatez-vous, à partir de l'analyse des données du tableau 1, sur le rôle de l'ATP dans la contraction musculaire ?

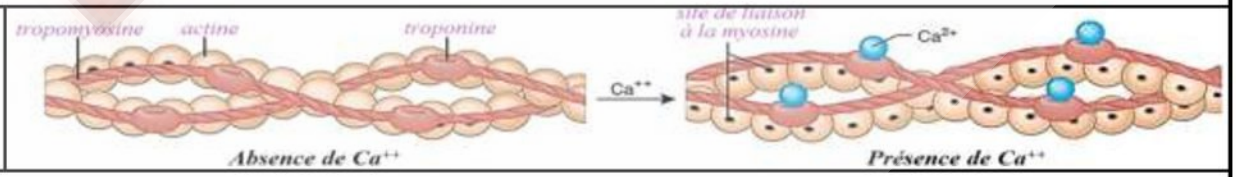
➢ *Troisième donnée :* Pour déterminer le rôle des ions Ca^{++} dans la contraction musculaire, on propose les données du tableau 2 et de la figure 2 :

- le tableau 2 représente les conditions et les résultats d'expériences réalisées sur certains constituants des myofilaments en milieu physiologiques ;
- la figure 2 montre l'effet des ions Ca^{++} sur les myofilaments fins.

Tableau 2

Expériences	Substances utilisées le milieu de culture	Résultats
1	Molécules de myosine + molécules d'actine + ATP + molécules de tropomyosine + molécules de troponine.	Pas de formation des complexes actomyosine → pas de glissement des molécules d'actine sur les molécules de myosine.
2	Molécules de myosine + molécules d'actine + ATP + molécules de tropomyosine + molécules de troponine + Ca^{++}	Formation des complexes actomyosine → glissement des molécules d'actine sur les molécules de myosine.

Figure 2



3. À partir de l'analyse des données du tableau 2 et de la figure 2, déterminez le rôle du Ca^{++} dans la contraction musculaire.

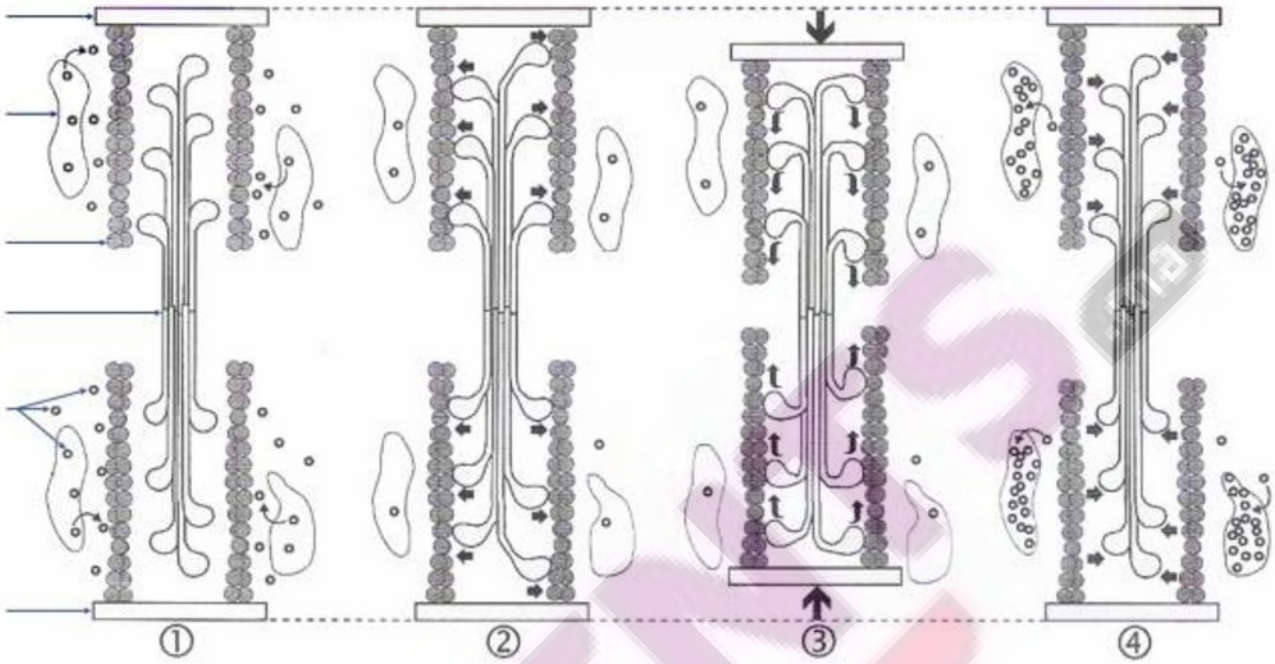
www.students.ma

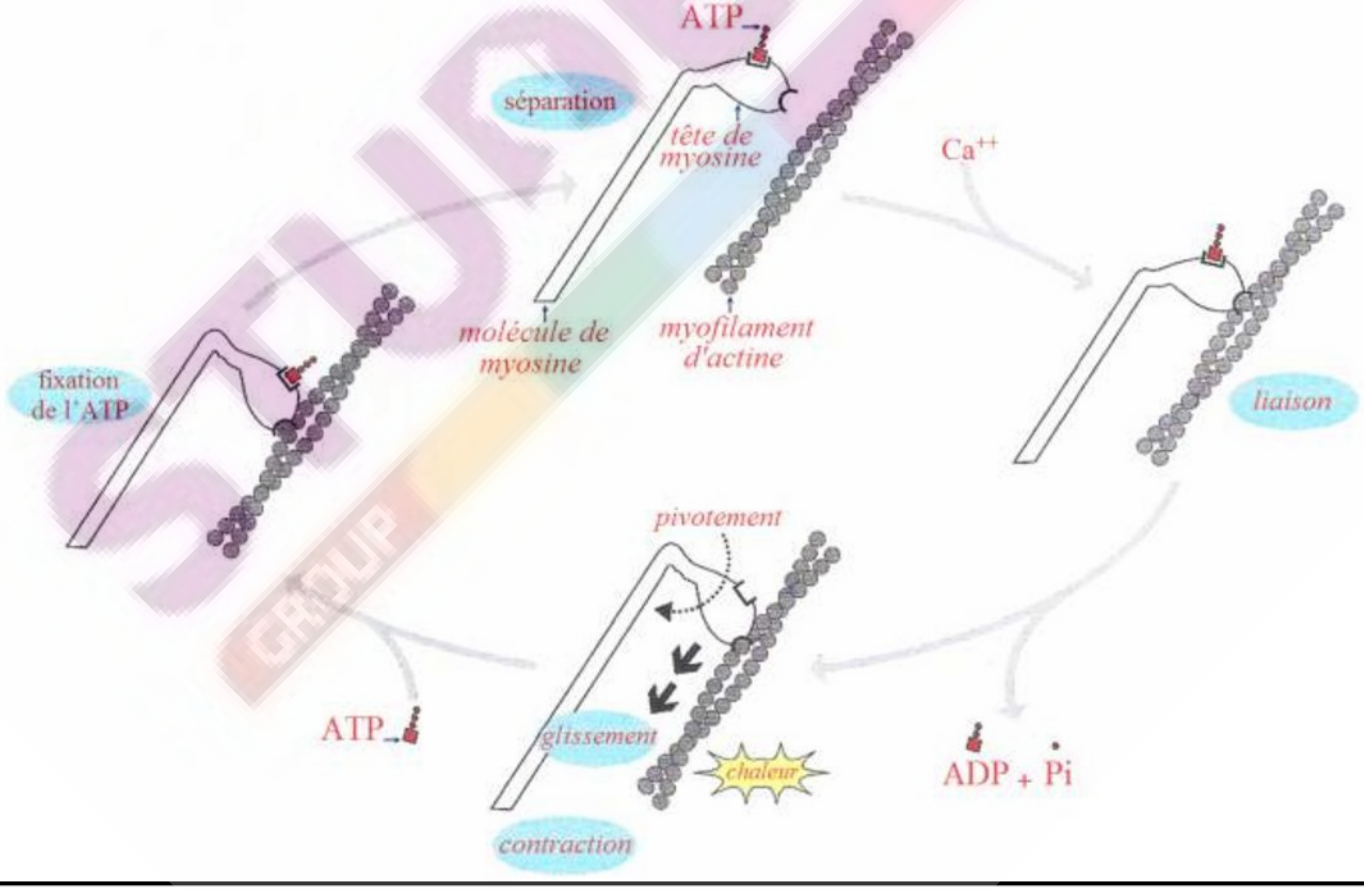
www.students.ma

C. Quelques modèles explicatifs du mécanisme de la contraction musculaire

1 Premier modèle *(doc.17)*

Document 17:





www.students.ma

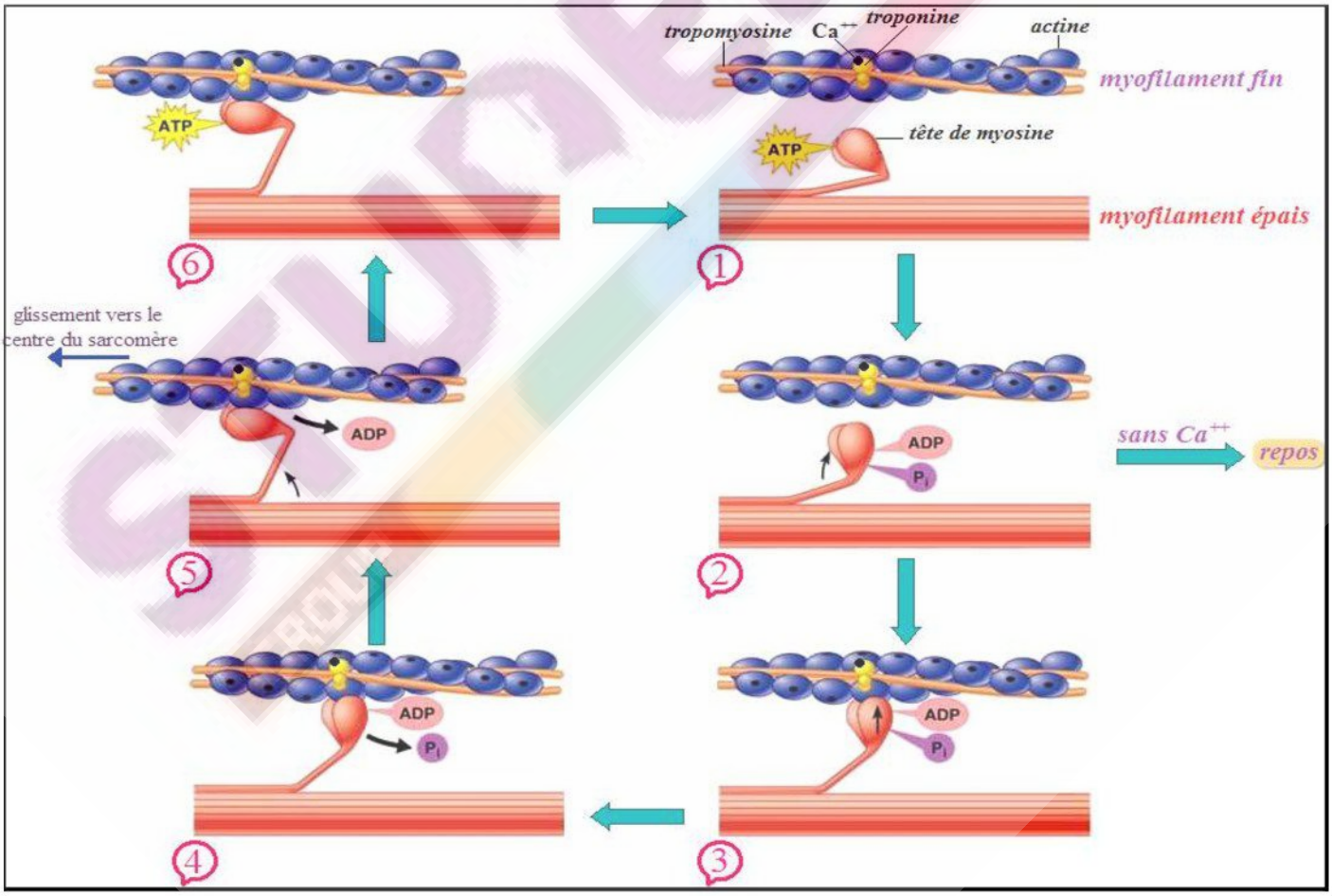
www.students.ma

- Selon ce model ancien, la contraction musculaire (raccourcissement des sarcomères) se déroule en quatre phases:
- ***La phase de repos***: elle se caractérise par ce qui suit :
  - les myofilaments fins sont séparés des myofilaments épais;
  - les molécules de tropomyosine masquent les sites de liaison situés au niveau des molécules d'actine;
  - les têtes de myosine sont perpendiculaires aux filaments d'actine; et chaque tête fixe une molécule d'ATP.
- ***La phase de liaison***: arrivée d'un influx nerveux au réticulum sarcoplasmique → libération de Ca^{++} par ce réticulum → démasquage des sites de liaison entre l'actine et la myosine → les têtes de myosine se lient aux molécules d'actines → formation des complexes actomyosine.
- ***La phase de glissement***: la formation des complexes actomyosine active l'hydrolyse des molécules d'ATP:
  - Une partie de l'énergie issue de l'hydrolyse de l'ATP est utilisée par les têtes de myosine qui pivotent de 45° vers le centre du sarcomère, il en résulte le glissement des myofilaments d'actine sur les myofilaments de myosine;
  - Une autre partie de l'énergie issue de l'hydrolyse de l'ATP est dégagée sous forme de chaleur, il s'agit de la chaleur de contraction qui fait partie de la chaleur initiale.
- *Constatation* : au cours de la contraction musculaire, les fibres musculaires convertissent l'énergie chimique issue de l'hydrolyse de l'ATP en énergie mécanique (glissement des myofilaments) et en énergie thermique (chaleur initiale).
- ***La phase de séparation***: chaque tête de myosine fixe une nouvelle molécule d'ATP, se détache de l'actine et retrouve sa position perpendiculaire par rapport au myofilament fin.

- Si la stimulation nerveuse se maintient, une nouvelle contraction musculaire aura lieu.
- En cas d'arrêt de la stimulation nerveuse, les ions Ca^{++} retournent au réticulum sarcoplasmique et le muscle retrouve l'état de repos.

2 Deuxième modèle *(doc.18)*

Document 18:



www.students.ma

www.students.ma

❖ *Analyse* :

1. Les têtes de myosine viennent de fixer une molécule d'ATP chacune, elles se séparent du myofilament d'actine avec lequel elles forment un angle de 45° environ.
2. Les têtes de myosine hydrolysent l'ATP en ADP et Pi, elles changent de conformation et deviennent perpendiculaire à l'axe du myofilament d'actine.
3. Les têtes de myosine porteuses d'ADP et Pi se lient aux molécules d'actine (formation des complexes actomyosine).
4. Libération du Pi par les têtes de myosine.
5. Après avoir libérer l'ADP, les têtes de myosine changent de conformation; elles pivotent de 45° faisant glisser les myofilament d'actine vers le centre du sarcomère.
6. Chaque tête de myosine fixe une nouvelle molécule d'ATP et se sépare de l'actine.

❖ *Conclusion*: Le raccourcissement des sarcomères est dû à un cycle de liaison-dissociation entre actine et myosine associé à des changements de conformation des têtes de myosine. Ce cycle se produit tant que l'ATP est disponible et que la concentration en Ca^{++} est élevée (au moins 1 µmol.L^{-1}), celle-ci étant nécessaire pour démasquer les sites de liaison situés dans les molécules d'actine.

IV. La régénération de l'ATP.

A. Exercices

1 Exercice 1 (doc.19)

Document 19:

➢ L'activité musculaire nécessite une présence permanente des molécules d'ATP qui fournissent à la cellule musculaire l'énergie nécessaire à sa contraction. Pour déterminer les voies de régénération de ces molécules par la cellule musculaire, on propose les données suivantes :

- Le tableau de la figure 1 donne la concentration de l'ATP dans les muscles, la quantité d'énergie qui lui correspond et la consommation d'énergie au cours d'un effort musculaire pour une personne de 70 kg.
- La figure 2 représente l'évolution des concentrations de l'ATP, de l'acide lactique et de la créatine-phosphate (CP) chez un athlète au cours d'une course de 100m (exercice musculaire intense et de courte durée) ;
- La créatine-phosphate ou phosphocréatine (CP) est un composé phosphaté à haute énergie emmagasiné dans les muscles, elle permet une régénération rapide de l'ATP selon la réaction anaérobie suivante : CP + ADP → ATP + C
- La figure 2 montre l'évolution de la consommation de l'O_2 chez une personne au cours d'un effort musculaire de longue durée.

1) En ***exploitant*** les données de la figure 1, montrez la nécessité de la régénération permanente des molécules d'ATP au niveau des cellules musculaires.
2) À partir de l'***analyse*** des données des figures 2 et 3, ***déduisez*** les voies métaboliques intervenant dans la régénération de l'ATP.

Concentration de l'ATP en m. mol	120 à 180
Quantité d'énergie en kJ correspondante à cette concentration.	5,1 à 7,5
Quantité d'énergie consommée au cours d'un effort musculaire en kJ.	35

Figure 1

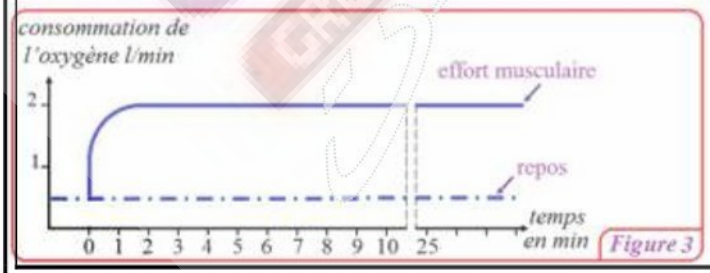


Figure 3

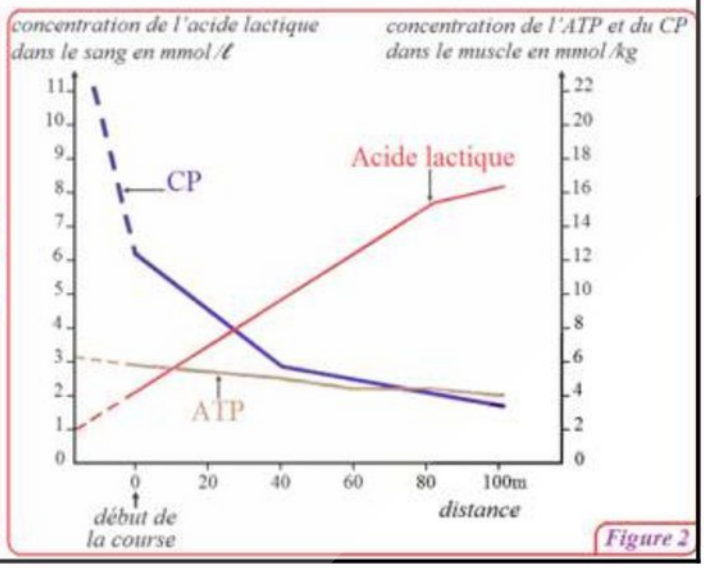


Figure 2

Éléments de réponse

1) Les réserves du muscle en énergie sont insuffisantes pour satisfaire les besoins énergétiques de l'effort musculaire :

www.students.ma

www.students.ma

ce dernier nécessite 35 kJ alors que la concentration de l'ATP dans le muscle ne procure que 5,1 à 7,5 kJ. Le maintien de l'effort musculaire nécessite donc une régénération permanente de l'ATP.

2) Au cours de l'exercice musculaire intense et de courte durée (figure 2), on remarque ce qui suit:

✓ La concentration de l'ATP reste presque constante, il y a donc une régénération permanente de l'ATP dans le muscle.

✓ La concentration du CP diminue progressivement, on déduit que la créatine-phosphate est utilisée dans la régénération de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire suivant la réaction suivante: CP + ADP → ATP + C

✓ La concentration de l'acide lactique augmente progressivement, cet acide résulte de la fermentation lactique qui permet de régénérer l'ATP utilisée dans la contraction musculaire.

✓ Au cours de l'effort musculaire de longue durée (figure 3), la consommation de l'O_2 augmente rapidement puis se stabilise à une valeur maximale égale à 2 ℓ/min, on déduit qu'il y a dans ce cas régénération de l'ATP par la voie de la respiration cellulaire aérobie.

2 Exercice 2 *(doc.20)*

Document 20:

❖ Pour mettre en évidence certaines voies métaboliques qui permettent la régénération de l'ATP, on propose les données suivantes : les muscles gastrocnémien de trois grenouilles sont soumis à des stimulations supraliminaires de même intensité pendant plusieurs minutes dans des conditions variées. On dose pour chaque muscle la concentration de certaines substances avant et après la contraction musculaire. Le tableau suivant présente les conditions et les résultats de cette manipulation.

Expériences et résultats	*Substances dosées*	*Résultats du dosage*	
		Avant la contraction	*Après la contraction*
- Expérience A : stimulations du muscle qui n'a subi aucun traitement (conditions témoins). - Résultat : contraction du muscle pendant toute la durée des stimulations.	- ATP - glycogène - acide lactique	- 4 à 6 m.mol/kg - 1,08 g/kg - 1 g/kg	- 4 à 6 m.mol/kg - 0,80 g/kg - 1,3 g/kg
- Expérience B : stimulations du muscle après injection de la substance S_1 qui inhibe la glycolyse. - Résultat : contraction du muscle pendant toute la durée des stimulations.	- ATP - glycogène - acide lactique - CP	- 4 à 6 m.mol/kg - 1,08 g/kg - 1 g/kg - 15 à 17 m.mol/kg	- 4 à 6 m.mol/kg - 1,08 g/kg - 1 g/kg - 3 à 4 m.mol/kg
- Expérience C : stimulations du muscle après injection de la substance S_1 et de la substance S_2 qui bloque la dégradation du CP. - Résultat : Le muscle se contracte pendant une courte durée, puis ne répond plus aux stimulations.	- ATP - glycogène - acide lactique - CP	- 4 à 6 m.mol/kg - 1,08 g/kg - 1 g/kg - 15 à 17 m.mol/kg	- 0 m.mol/kg - 1,08 g/kg - 1 g/kg - 15 à 17 m.mol/kg

1) ***Analysez*** et ***interprétez*** les résultats des différentes expériences réalisées.

Éléments de réponse

➢ ***Expérience A :***

✓ La concentration de l'ATP reste constante après la contraction du muscle, il y a donc une régénération permanente de l'ATP ce qui a permis au muscle de se contracter pendant toute la durée des stimulations

✓ La quantité du glycogène diminue après la contraction, ce sucre est donc dégradé en glucose qui est utilisé comme métabolite énergétique.

✓ La concentration de l'acide lactique augmente après la contraction. On déduit que les cellules musculaires produisent cet acide, elles utilisent la fermentation lactique comme voie de régénération de l'ATP.

➢ ***Expérience B :***

✓ La concentration de l'ATP demeure constante après la contraction. Il y a régénération de l'ATP ce qui a permis la contraction du muscle pendant toute la durée des stimulations.

✓ La quantité du glycogène et celle de l'acide lactique restent constantes. Cela s'explique par l'action de la substance S_1: l'inhibition de la glycolyse arrête la dégradation du glycogène et bloque la fermentation lactique.

✓ La concentration du CP diminue après la contraction, on déduit que les cellules musculaires utilisent la créatine-phosphate pour la régénérer l'ATP selon la réaction suivante : CP + ADP → ATP + C.

www.students.ma

www.students.ma

➢ ***Expérience C :***

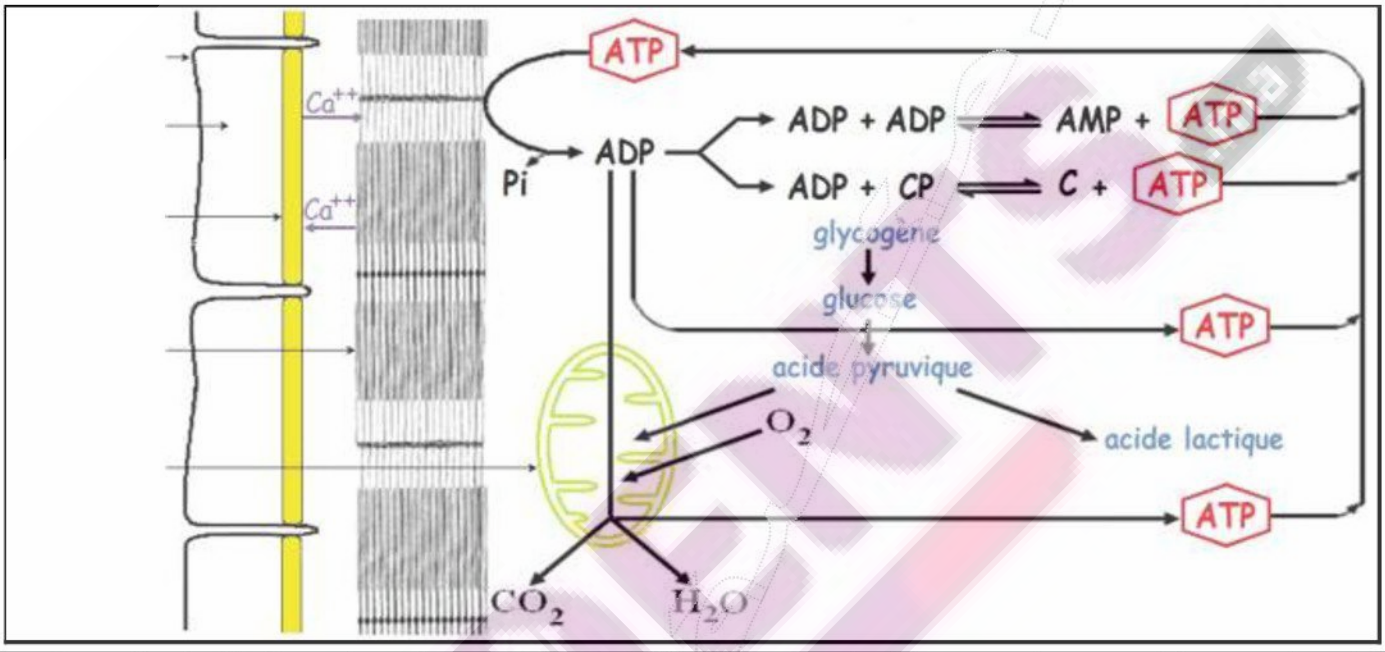
✓ La substance S_1 arrête la dégradation du glycogène et bloque la fermentation lactique → la quantité du glycogène et celle de l'acide lactique ne changent pas après la contraction musculaire.

✓ La substance S_2 inhibe la dégradation du CP → la concentration du CP reste constante après la contraction.

✓ La concentration de l'ATP devient nulle après la contraction. L'ATP a été utilisée jusqu'à l'épuisement et elle n'a pas été renouvelée car les voies de sa régénération sont bloquées par S_1 et S_2. En absence de l'ATP, le muscle ne répond plus aux stimulations.

B. Conclusion : les voies de la régénération de l'ATP *(doc.21)*

Document 21



➢ La molécule d'ATP représente la source directe de l'énergie nécessaire à la contraction musculaire, cette énergie provient de l'hydrolyse de l'ATP selon la réaction suivante :

$$ATP + H_2O \longrightarrow ADP + Pi + \text{Energie chimique}$$

Energie chimique → Energie mécanique → Contraction

Energie chimique → Energie thermique → Chaleur initiale

➢ Dans un muscle, les réserves d'ATP sont faibles (environ 5 m.mol / kg de muscle). A ces réserves peut correspondre une contraction de quelques secondes (2 à 3s). La régénération de l'ATP est donc obligatoire.

➢ Il existe trois voies de la régénération de l'ATP: la voie rapide anaérobie, la voie lente anaérobie et la voie lente aérobie.

1 La voie rapide anaérobie ou voie anaérobie alactique.

➢ • Il s'agit de deux réactions chimiques anaérobies qui ne produisent pas l'acide lactique et qui libèrent la chaleur initiale.

$$ADP + ADP \longrightarrow ATP + AMP + \text{Chaleur initiale}$$
$$CP + ADP \longrightarrow ATP + C + \text{Chaleur initiale}$$

2 La voie lente anaérobie ou voie anaérobie lactique

❖ Il s'agit de la fermentation lactique qui produit l'acide lactique: glycogène → glucose → acide pyruvique → acide lactique On écrit l'équation globale de la fermentation lactique comme suit:

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow \underset{\text{acide lactique}}{2CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH} + \underset{\text{énergie}}{2ATP}$$
glucose

www.students.ma

www.students.ma

- La voie anaérobie lactique intervient pour des activités mécaniques d'une durée comprise entre 10 secondes et 1 à 2 minutes. Elle intervient également lorsque les efforts imposés sont très importants, de sorte qu'ils dépassent les capacités maximales d'approvisionnement en dioxygène.

- *Remarque :*
  - L'accumulation de l'acide lactique diminue le pH du muscle, il en résulte une diminution de l'efficacité des enzymes. C'est l'une des causes de la fatigue musculaire qui s'explique aussi par le faible rendement énergétique de la fermentation lactique (2ATP). L'acide lactique accumulé gêne aussi la contraction musculaire et provoque des douleurs et des crampes.

  - Au repos, l'acide lactique est transféré vers le cœur et le foie où il est oxydé ou transformé en pyruvate puis en glycogène.

3 La voie lente aérobie

- Il s'agit de la respiration cellulaire anaérobie : oxydation complète du glucose en substances minérales (CO_2 et H_2O) avec un rendement énergétique important (36 ou 38ATP) et libération d'énergie thermique qui est la chaleur retardée.

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{Energie} \begin{cases} \rightarrow 36 \text{ ou } 38ATP \\ \rightarrow \text{chaleur retardée} \end{cases}$$

- La voie respiratoire assure durablement la production d'ATP, c'est la voie la plus efficace pour la régénération de l'ATP. Elle intervient au repos et au cours des activités musculaires prolongées qui dépassent une durée de 1 à 2 minutes (cas des sports d'endurance comme les courses de fond).

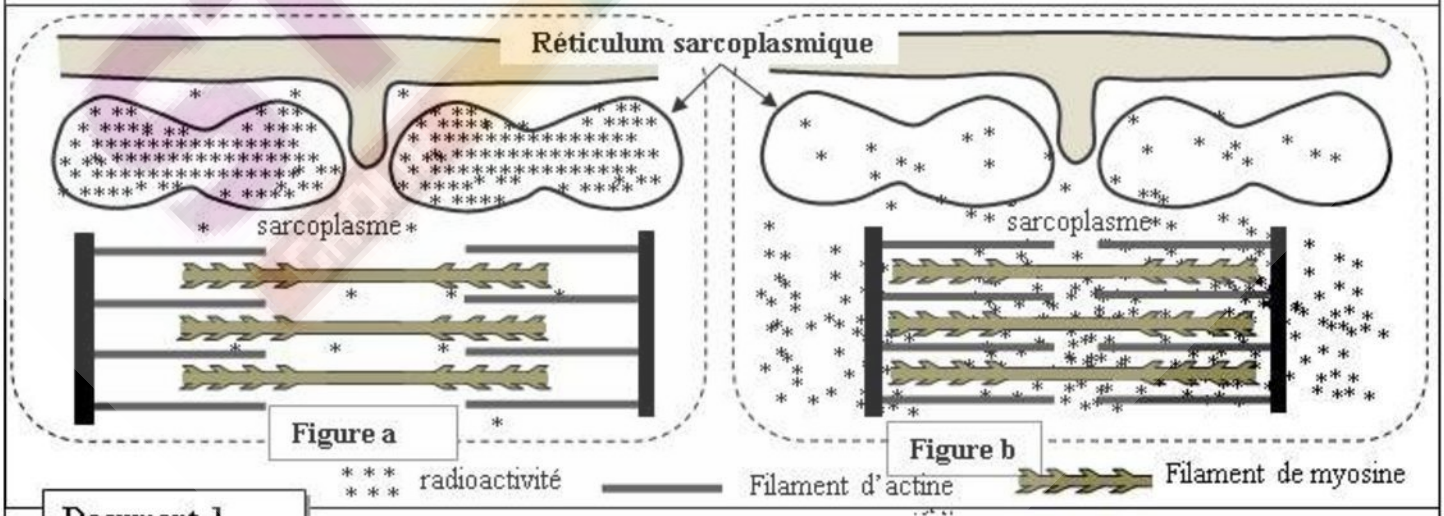
- *Remarque important:* une partie de l'ATP issue de la respiration cellulaire est utilisée pour le renouvellement de la créatine-phosphate CP selon la réaction suivante :

$$ATP + C \longrightarrow CP + ADP$$

Exercice d'application (nor.svt.2016)

On cherche à étudier quelques aspects du mécanisme de la contraction musculaire et à montrer le rôle des ions Ca^{2+} dans ce mécanisme. Dans ce cadre on propose les données suivantes :

Donnée 1 : Des fibres musculaires striées sont isolées et cultivées dans un milieu physiologique contenant des ions calcium radioactifs ($^{45}Ca^{2+}$) puis elles sont réparties en deux lots 1 et 2. Les fibres du lot 1 sont fixées en état de relâchement alors que les fibres du lot 2 sont fixées en état de contraction. Par autoradiographie, on détecte la localisation de la radioactivité au niveau des fibres de chaque lot. Les figures du document 1 présentent des schémas explicatifs des résultats de cette détection (la figure a pour les fibres du lot 1, la figure b pour les fibres du lot 2).



Document 1

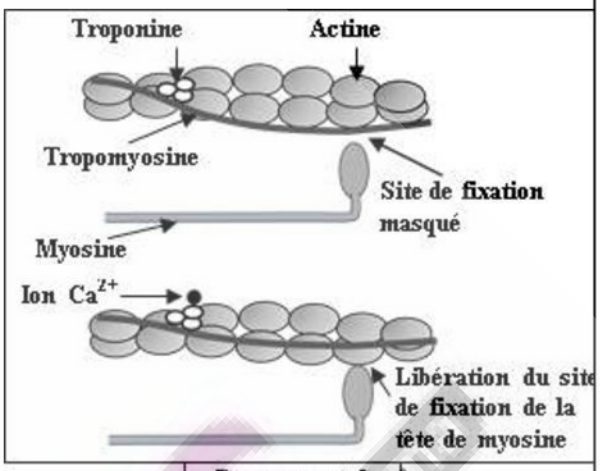
www.students.ma

www.students.ma

1. **Comparez** la répartition de la radioactivité dans les fibres des lots 1 et 2, puis **dégagez** le sens de déplacement des ions calcium lorsque la fibre musculaire passe de l'état de relâchement à l'état de contraction.

- **Donnée 2:** L'étude biochimique et l'observation électronographique des myofilaments d'actine et de myosine, dans des fibres musculaires en présence et en absence d'ions Ca^{2+}, ont permis de construire le modèle explicatif présenté dans le document 2.

2. En vous **basant** sur les résultats présentés dans le document 2, **montrez** comment interviennent les ions Ca^{2+} dans la contraction de la fibre musculaire. (0,75 pt)



Document 2

- **Donnée 3:** Pour extraire l'énergie nécessaire à sa contraction, la fibre musculaire hydrolyse de grandes quantités d'ATP. Afin de déterminer certaines conditions nécessaires à l'hydrolyse de ces molécules, on présente les données expérimentales du document 3.

Milieux	Composition des milieux	
	Début de l'expérience	**Fin de l'expérience**
Milieu 1	Filaments de myosine + filaments d'actine + ATP + Ca^{2+}	Complexes actomyosine + Ca^{2+} + une grande quantité d'ADP et de Pi
Milieu 2	Filaments d'actine + ATP + Ca^{2+}	Filaments d'actine + ATP + Ca^{2+}
Milieu 3	Filaments de myosine + ATP + Ca^{2+}	Filaments de myosine + ATP + Ca^{2+} + une faible quantité d'ADP et de Pi

Document 3

3. **En exploitant** les données du document 3, **expliquez** la différence d'hydrolyse de l'ATP observée dans les différents milieux.

4. **En vous basant** sur les données précédentes et sur vos connaissances, **résumez** l'enchainement des événements conduisant à la contraction du muscle suite à une excitation.

➢ **Éléments de correction (nor.svt.2016)**

1	**Comparaison** - Pour le premier lot : forte radioactivité (Ca^{2+}) au niveau du réticulum sarcoplasmique en comparaison avec le sarcoplasme…….. - Pour le deuxième lot : faible radioactivité (Ca^{2+}) au niveau du sarcoplasme en comparaison avec le réticulum sarcoplasmique…… **Déduction:** lors du passage de l'état de relâchement à l'état de contraction, les ions Ca^{2+} passent du réticulum sarcoplasmique vers le sarcoplasme……
2	**Mécanisme de l'intervention des ions Ca^{2+} dans la contraction de la fibre musculaire:** - fixation des ions Ca^{2+} sur la troponine → libération des sites de fixation des têtes de myosines sur l'actine suite au déplacement de la tropomyosine → formation du complexe actomyosine……
3	**Explication :** -L'hydrolyse de grandes quantités d'ATP dans le milieu 1 s'explique par la formation du complexe actomyosine. -L'hydrolyse de faibles quantités d'ATP dans le milieu 3 s'explique par l'absence du complexe actomyosine car ce milieu ne contient que la myosine……..
4	**La succession des événements depuis l'excitation à la contraction musculaire :** - suite à l'excitation du muscle, les ions Ca^{2+} sont libérés à partir du réticulum sarcoplasmique; - libération des sites de fixation des têtes de myosines; - formation des complexes actomyosine; -rotation des têtes de myosines aboutissant au glissement des filaments d'actine entre les filaments de myosine ce qui entraine la contraction musculaire…… ..

www.students.ma

www.students.ma

➢ Exercice d'application (Rat.Svt.2016)

I- Pour chacune des propositions numérotées de 1 à 4, il y a une seule suggestion correcte.
Recopiez les couples (1,…) ; (2,…) ; (3,…) ; (4,…), et **adressez** à chaque numéro la lettre correspond à la suggestion correcte. (2 pts)

1 – La fermentation lactique produit : **a-** L'acide pyruvique, le CO_2 et l'ATP; **b-** L'acide pyruvique et le CO_2; **c-** L'acide lactique, le CO_2 et l'ATP; **d-** L'acide lactique et l'ATP.	**2 – Le cycle de Krebs produit :** **a-** $NADH,H^+$, $FADH_2$, ATP et l'acide pyruvique ; **b-** $NADH,H^+$, $FADH_2$, CO_2 et l'acétyle coenzyme A; **c-** $NADH,H^+$, ATP , CO_2 et l'acide pyruvique; **d-** $NADH,H^+$, $FADH_2$, ATP et CO_2.
3- Les filaments fins de la myofibrille sont formés de : **a-** L'actine, la myosine et la troponine; **b-** L'actine, la myosine et la tropomyosine; **c-** L'actine, la troponine et la tropomyosine; **d-** La myosine, la troponine et la tropomyosine.	**4- La contraction musculaire :** **a-** Se produit en absence de l'ATP, et de l'O_2; **b-** Nécessite toujours la présence des ions calcium et de l'ATP; **c-** Se produit en absence des ions calcium et de l'ATP; **d-** Se produit en absence des ions calcium et de l'O_2.

II- Reliez chaque étape de la respiration cellulaire à la structure cellulaire correspondante : **Recopiez** les couples (1, ….) ; (2, ….) ; (3, ….) ; (4, ….) et **adressez** à chaque numéro la lettre correspondante.

Etapes de la respiration cellulaire	Structures cellulaires
1 – Les réactions de la chaîne respiratoire.	**a** – De part et d'autre de la membrane interne mitochondriale.
2 – Les réactions de la glycolyse.	**b** – La matrice.
3 – Le cycle de Krebs.	**c** – Le hyaloplasme.
4 – La formation d'un gradient de protons.	**d** – La membrane interne mitochondriale.

III- Pour chacune des propositions 1 et 2, **recopiez** la lettre de chaque suggestion, et **écrivez** devant chacune d'elles « vrai » ou « faux » :

1 – Les réactions de la fermentation alcoolique :

a	Se déroulent dans la matrice mitochondriale en absence du dioxygène.
b	Se déroulent dans le hyaloplasme en absence du dioxygène.
c	Produisent l'éthanol, le CO_2 et l'ATP.
d	Produisent l'acide lactique, le CO_2 et l'ATP.

2- Lors de la contraction musculaire, on assiste à un:

a	Raccourcissement des bandes sombres sans changement de la longueur des bandes claires.
b	Raccourcissement des bandes claires sans changement de la longueur des bandes sombres.
c	Rapprochement des deux stries Z avec raccourcissement de la zone H du sarcomère.
d	Raccourcissement des bandes claires sans changement de la longueur de la zone H du sarcomère.

➢ Éléments de réponses. (nor.svt.2016)

I	(1,d) ;	(2,d) ;	(3,c) ;	(4,b)
II	(1,d) ;	(2,c) ;	(3,b) ;	(4,a)
III	1- a: faux	b : vrai	c : vrai	d : faux
	2- a : faux	b : vrai	c : vrai	d : faux

www.students.ma