

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

Introduction:

Le corps est capable d'effectuer des mouvements multiples et variés, qui résultent de la contraction des muscles squelettiques striés. L'énergie nécessaire à la contraction est fournie à la cellule musculaire par les molécules d'ATP. Au sein des cellules musculaires il existe donc une conversion de l'énergie chimique (ATP), en énergie mécanique.

- Comment peut-on enregistrer les contractions musculaires?
- Quels sont les structures qui permettent au muscle squelettique strié de se contracter ?
- Quels sont les phénomènes accompagnant la contraction musculaire?
- Comment l'énergie chimique de l'ATP est convertie par le muscle en énergie mécanique?

I – Etude expérimentale de la contraction musculaire

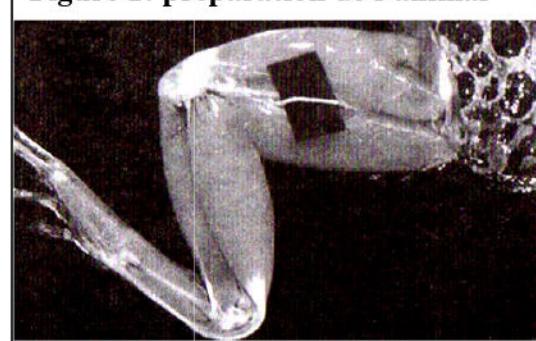
① Méthode d'enregistrement des contractions musculaires: (Voir document 1)

Document 1: Enregistrement de la contraction musculaire chez la grenouille:

A fin d'étudier l'activité contractile d'un muscle, on utilise le muscle gastrocnémien d'une grenouille démédullée et décérébrée :

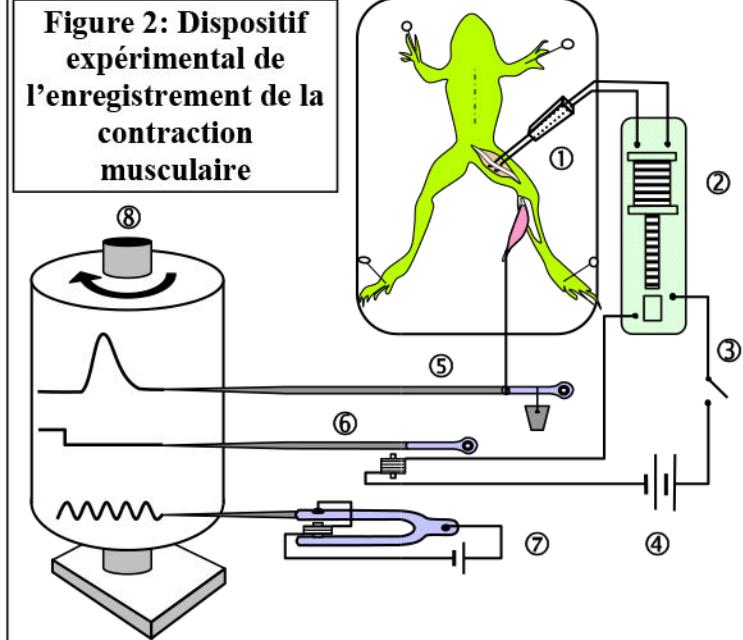
- On place l'animal sur une planchette, la face ventrale contre le liège, et on fixe le genou de l'un des deux membres inférieurs.
- On enlève la peau de la patte immobilisée, et on dégage le muscle gastrocnémien, et le nerf sciatique (Figure 1).
- On sectionne le tendon inférieur du muscle et on le relie par un fil à un myographe.

Figure 1: préparation de l'animal



- On place des électrodes d'excitation à la surface du nerf sciatique ou à la surface du muscle.
- On provoque ensuite des excitations électriques et on enregistre la contraction musculaire à l'aide du stylet inscripteur qui marque du papier fixé sur un cylindre enregistreur, animé d'un mouvement de rotation uniforme et réglable.

Figure 2: Dispositif expérimental de l'enregistrement de la contraction musculaire



- 1) Donnez les noms correspondants aux numéros de la figure 2, puis dégagez les conditions expérimentales permettant d'enregistrer la contraction musculaire.
- 2) Dégagez deux propriétés caractérisant le muscle.

- 1) Les noms correspondants aux numéros de la figure 2 :
- ① = Electrodes excitatrices ; ② = Excitateur électrique ; ③ = Interrupteur ;
 - ④ = générateur ; ⑤ = Stylet inscripteur ; ⑥ = Signal d'excitation ;
 - ⑦ = Signal de temps (Diapason) ; ⑧ = Cylindre enregistreur.

Pour réaliser l'étude expérimentale de la contraction musculaire:

- ✓ On doit détruire l'encéphale et la moelle épinière de la grenouille, pour éliminer toute activité volontaire ou réflexe.
- ✓ On applique une excitation efficace, soit directement sur le muscle ou indirectement par l'intermédiaire de son nerf moteur.
- ✓ Les excitants sont de nature variée, soit mécanique, thermique, chimique ou électrique.
- ✓ L'excitation provoquant une réponse musculaire doit être efficace. c'est à dire d'une intensité supérieur ou égale à la rhéobase (intensité minimale provoquant une réponse) Les intensités inférieures à la rhéobase, sont inefficaces, et sont nommées infraliminaires.

- 2) Le muscle répond à une excitation efficace, il est excitable et présente la propriété excitabilité. Le muscle répond à une excitation par contraction, il est donc contractile et la propriété est appelée contractilité.

② Réponse du muscle aux excitations électriques:

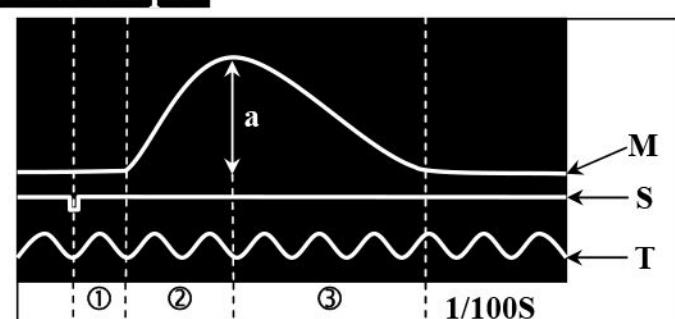
- a) Cas d'une excitation unique: (Voir document 2)

Document 2: Réponse du muscle à une excitation unique:

Le document ci-contre représente l'enregistrement obtenu suite à l'application d'une excitation unique et efficace.

M = Myogramme ; S = Signal d'excitation ; T = Chronographe ; a = amplitude
 ① = Temps de latence ; ② = Phase de contraction ; ③ = Phase de relâchement

Décrivez la réponse musculaire enregistrée.



Lorsqu'on applique directement sur le muscle ou sur son nerf moteur, une excitation électrique unique et efficace, on obtient une contraction brève et isolée à laquelle on donne le nom de secousse musculaire.

Le myogramme obtenu est composé de trois phases :

- ✓ La phase de latence: correspond à la durée entre le moment de l'excitation et le début de la réponse. C'est le temps nécessaire à l'arrivée de l'influx nerveux au muscle.
- ✓ La phase de contraction: la phase au cours de laquelle la longueur du muscle décroît (raccourcissement du muscle).
- ✓ La phase de relâchement: la phase au cours de laquelle le muscle reprend ses dimensions initiales (sa durée est légèrement supérieure à celle de la phase de contraction)

- b) Cas de plusieurs excitations à intensité croissante: (Voir document 3)

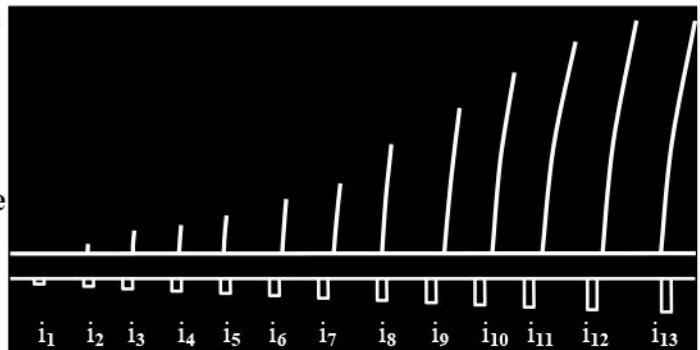
Document 3: Réponse du muscle à plusieurs excitations:

On soumet un muscle gastrocnémien de grenouille à une série d'excitations isolées ($i_1, i_2, i_3, \dots, i_{13}$), d'intensité croissante.

Le cylindre enregistreur est immobile, et on le tourne à la main après chaque excitation.

Le myogramme obtenu est représenté par la figure ci-contre.

Décrire les résultats obtenus puis établir la relation entre l'intensité de l'excitant et l'amplitude de la réponse.



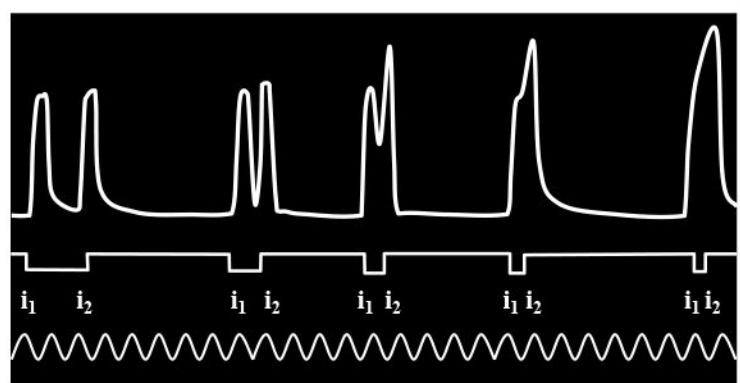
- ★ L'excitation (i_1) ne donne pas de réponse. Cette excitation est donc inefficace, le seuil d'excitation n'étant pas encore atteint.
- ★ A partir de l'excitation (i_2) (Seuil d'excitabilité), on enregistre une réponse dont l'amplitude augmente progressivement. Cette augmentation de l'amplitude est consécutive au recrutement d'un nombre croissant d'unités musculaires. C'est la loi de recrutement.
- ★ Quand l'intensité d'excitation atteint une valeur maximale (i_{12}), l'amplitude de la réponse reste constante même si l'intensité de l'excitation continue d'augmenter, car toutes les unités constituant le muscle se contractent.
- ★ Il y'a donc une relation entre l'intensité de l'excitation et l'amplitude de la réponse:
On obtient une réponse minimale du muscle lorsque l'intensité de l'excitant atteint le seuil d'excitation qu'on appelle rhéobase. A partir de ce seuil, toutes les excitations sont efficaces et l'amplitude de la réponse augmente avec l'augmentation de l'intensité de l'excitation.

c) Cas de deux excitations rapprochées: (Voir document 4)

Document 4: Réponse du muscle à deux excitations efficaces rapprochées :

On soumet plusieurs fois, un muscle à deux excitations efficaces successives de même intensité (i_1, i_2). A chaque fois, on diminue l'intervalle de temps entre les deux excitations. On obtient alors les myogrammes représenté par la figure ci-contre.

Décrire l'enregistrement et établir la relation entre l'intervalle de temps entre deux excitations successives et l'aspect de la réponse musculaire.



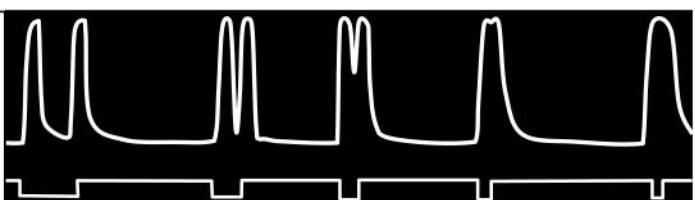
Lorsqu'on soumet le muscle à deux excitations efficaces successives, la réponse diffère selon l'instant où on applique la deuxième excitation :

- ✓ Si les deux excitations sont suffisamment éloignées on enregistre deux secousses musculaires isolées et de même amplitude.
- ✓ Si les deux excitations sont rapprochées et que la 2^{ème} excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement de la réponse précédente, il se produit une fusion incomplète (partielle) des deux secousses musculaires avec une augmentation de l'amplitude de la 2^{ème} secousse.
- ✓ Si les deux excitations sont très rapprochées et que la 2^{ème} excitation atteint le muscle pendant la

phase de contraction de la réponse précédente, on observe une fusion complète (totale) des deux secousses qui apparaissent comme s'il n'y a qu'une seule secousse musculaire d'une amplitude plus grande.

Remarque :

Si on répète l'expérience précédente, mais en utilisant des excitations d'intensité provoquant la réponse maximale du muscle, les deux secousses musculaires auront la même amplitude dans tout les cas.

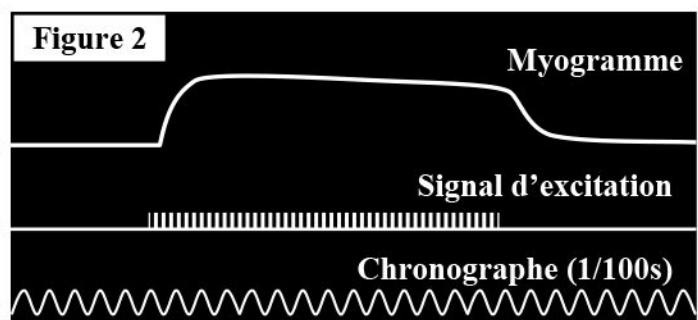
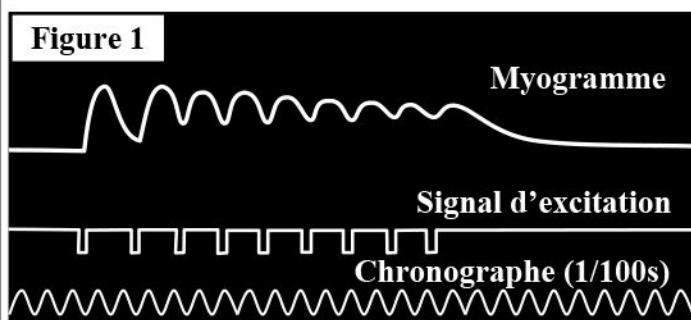


d) Cas d'une série d'excitations successives: (Voir document 5)

Document 5 : Réponse du muscle à une série d'excitations efficaces:

On soumet un muscle à une série d'excitations efficaces successives de même intensité tout en variant la fréquence des excitations :

- Avec une fréquence de 12 excitations par secondes on obtient le myogramme de la figure 1.
- Avec une fréquence de 32 excitations par secondes on obtient le myogramme de la figure 2.



Comparez les myogrammes de la figure 1 et la figure 2 et expliquez les phénomènes observés.

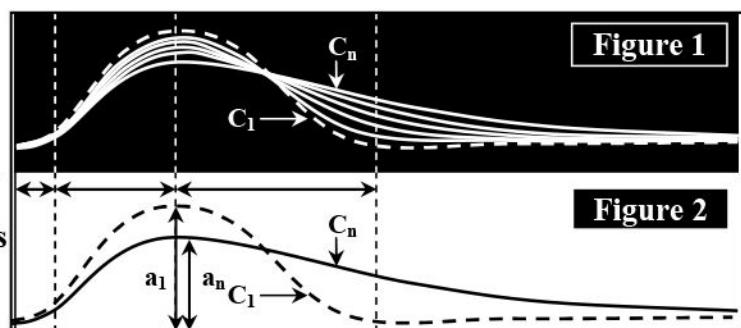
- ✓ Figure 1: quand la fréquence des excitations est faible, le myogramme obtenu prend l'allure d'un palier sinueux. La réponse du muscle est dite, alors, tétanos imparfait. Ce phénomène peut être expliqué par la fusion incomplète des secousses musculaires, car chaque excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement de la réponse précédente.
- ✓ Figure 2: quand la fréquence des excitations est forte, le myogramme obtenu prend l'allure d'un palier droit. La réponse du muscle est dite, alors, tétanos parfait. Ce phénomène peut être expliqué par la fusion complète des secousses musculaires, car chaque excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction de la réponse précédente.

e) Effet de la fatigue sur la contraction musculaire: (Voir document 6)

Document 6: la fatigue musculaire :

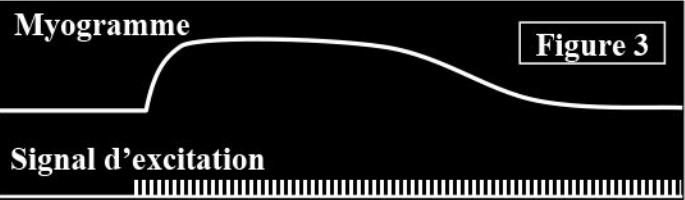
★ On applique sur un muscle une série d'excitations de même intensité pendant une durée très longue.

A fin d'obtenir une superposition des enregistrements, on règle la vitesse de rotation du cylindre enregistreur de tel sorte qu'une excitation unique se produit à chaque tour. Les résultats sont représentés par la figure 1 et la figure 2.



Document 6 (Suite): la fatigue musculaire :

C_1 = la secousse musculaire d'amplitude a_1 , obtenue à la suite de la première excitation.
 C_n = la secousse musculaire d'amplitude a_n , obtenue à la suite de la dernière excitation.



★ On soumet un muscle à une série d'excitations efficace de même intensité et à une fréquence très élevée. On obtient le tracé appelé courbe de fatigue (Figure 3).

En exploitant les données de ce document, déterminez comment se traduit la fatigue musculaire au niveau de la secousse musculaire.

- ★ On constate à partir des résultats présentés par la figure 1 et la figure 2, une diminution progressive de l'amplitude des secousses musculaires avec une augmentation de la durée de relâchement.
- ★ La figure 3 montre une diminution progressive de l'amplitude des secousses jusqu'à l'immobilité complète du muscle. Il s'est produit donc une fatigue progressive du muscle.

La fatigue musculaire se manifeste donc par la diminution de l'amplitude de la réponse musculaire et par une augmentation du temps de relâchement.

II – Les phénomènes accompagnant la contraction musculaire

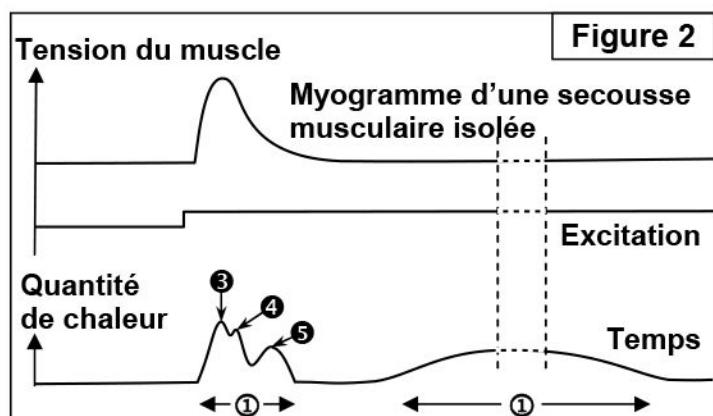
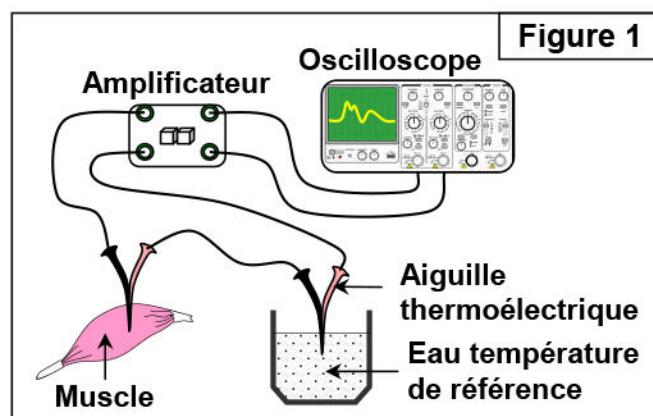
Les différents aspects de la contraction musculaire constituent les phénomènes mécaniques. Ces derniers s'accompagnent de phénomènes thermiques, chimiques et énergétiques.

① Les phénomènes thermiques:

a) Protocole expérimental: (Voir document 7)

Document 7: Phénomènes thermiques accompagnant la contraction:

Pour mesurer la chaleur dégagée lors de la contraction musculaire, Hill et Haltréa ont utilisés un appareil appelé thermopile (Figure 1). Ce dernier comprend deux aiguilles thermoélectriques formées de deux métaux différents (Cuivre-Nickel), l'une est introduite dans le muscle, l'autre est maintenue à une température constante. La différence de température entre les deux aiguilles se traduit par une différence de potentiel (ddp) dont la valeur est proportionnelle à la température du muscle contracté. Cette ddp se traduit au niveau de l'oscilloscope sous forme de courbes (Figure 2).



- 1) En exploitant, en parallèle, le myogramme et la courbe de variation de la chaleur dégagée, déterminez les différents types de chaleur libérés par le muscle lors d'une activité musculaire.

L'expérience de Hill étant refaite en milieu anaérobie, on constate le dégagement de la chaleur ①, mais la chaleur ② est pratiquement nulle.

- 2) Que peut-on conclure de ces résultats?

b) Exploitation des résultats:

- 1) Au cours d'une activité musculaire, le muscle dégage de la chaleur en deux temps :
 - ✓ La chaleur initiale (①), qui se dégage rapidement au cours de la secousse musculaire et dont une partie est libérée au cours de la phase de contraction (Chaleur de contraction (③) et chaleur de soutien (④)), et l'autre partie au cours de la phase de relâchement (Chaleur de relâchement (⑤)).
 - ✓ La chaleur retardée (②) se dégage lentement après la secousse musculaire.
- 2) L'absence de dégagement de chaleur retardée en milieu anaérobie prouve que la respiration cellulaire en constitue la source, alors que l'origine de la chaleur initiale est la fermentation lactique.

① Les phénomènes chimiques et énergétiques:

a) Données expérimentales: (Voir document 8)

Document 8: Phénomènes chimiques et énergétiques accompagnant la contraction musculaire:

★ On analyse le sang à l'entrée et à la sortie d'un muscle au repos et après une activité musculaire.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-contre.

- 1) Comparez les besoins d'un muscle en activité et au repos. Que peut-on déduire?

★ Le tableau ci-contre, présente les variations de la consommation du dioxygène et de la concentration de l'acide lactique en fonction de l'intensité de l'effort musculaire exprimée en énergie fournie.

- 2) Décrire les résultats présentés par ce tableau et déduire les sources d'énergie nécessaires à la contraction musculaire.

Paramètres sanguins (par heure et par Kg de muscle)	Muscle au repos	Muscle en activité
Volume de sang traversant le muscle	12.220 l	56.325 l
O ₂ consommé	0.307 l	5.207 l
CO ₂ rejeté	0.220 l	5.950 l
Glucose utilisé	2.042 g	8.432 g
Protides utilisés	0 g	0 g
Lipides utilisés	0 g	0 g

Energie fournie (KJ/min)	Consommation d'O ₂ (l/min)	Acide lactique (g/l)
44	2.17	Traces
52	2.8	Traces
58.5	3.01	Traces
68	3.04	1.95
79.5	3.04	13.43
92	3.04	26.8
101	3.04	37.66

★ Au cours de trois exercices musculaires d'intensité croissante, on mesure les variations de la consommation de glucose par les muscles des jambes (Figure 1), et les variations de la teneur en glycogène dans les muscles des jambes (Figure 2).

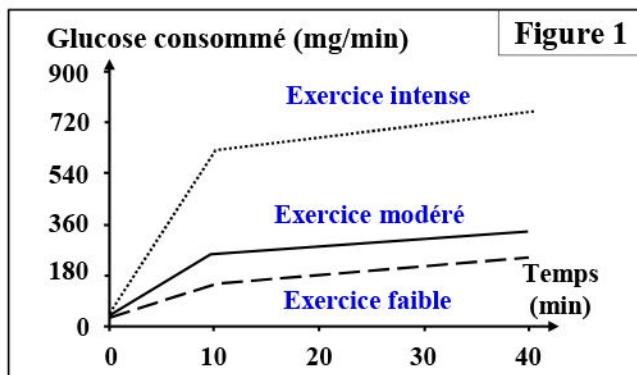


Figure 1

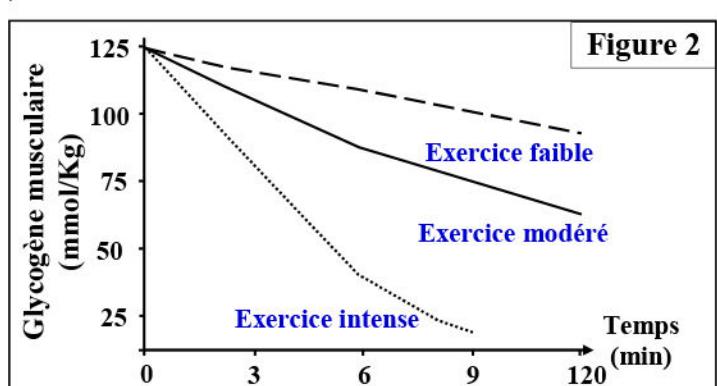


Figure 2

- 3) Décrire les résultats représentés sur la figure 1 et 2 de ce document. Expliquez les variations observées.

b) Exploitation des résultats:

1) Les résultats expérimentaux montrent que lors de l'activité musculaire:

- ✓ Le muscle bénéficie d'une augmentation du débit sanguin qui permet l'intensification des échanges.
- ✓ Le muscle utilise beaucoup plus de glucose et du dioxygène, et produit d'avantage de CO_2 .
- ✓ Le muscle ne consomme pas les protides et les lipides mais utilise uniquement le glucose que ce soit en activité ou au repos.

Ces phénomènes chimiques traduisent l'oxydation du glucose qui produit l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

2) Lors d'une activité musculaire d'intensité croissante, la consommation du dioxygène augmente jusqu'à une valeur de 3.04 l/min.

Lorsque la consommation du dioxygène reste constante, malgré l'augmentation de l'effort musculaire, le muscle commence à produire de l'acide lactique.

Cependant, le muscle reste capable de se contracter en cas de pénurie ou d'absence du dioxygène.

A partir de ces résultats on peut dire qu'il y a deux types de réactions chimiques qui accompagnent la contraction musculaire: des réactions aérobies et des réactions anaérobies.

3) Plus l'intensité de l'effort sera grande, plus la consommation du glucose s'accroît et les réserves du muscle en glycogène diminuent.

Lors d'un effort physique, les besoins en énergie des muscles augmentent. Un apport supplémentaire de glucose est donc nécessaire, cela provient donc de l'hydrolyse des réserves de glycogène.

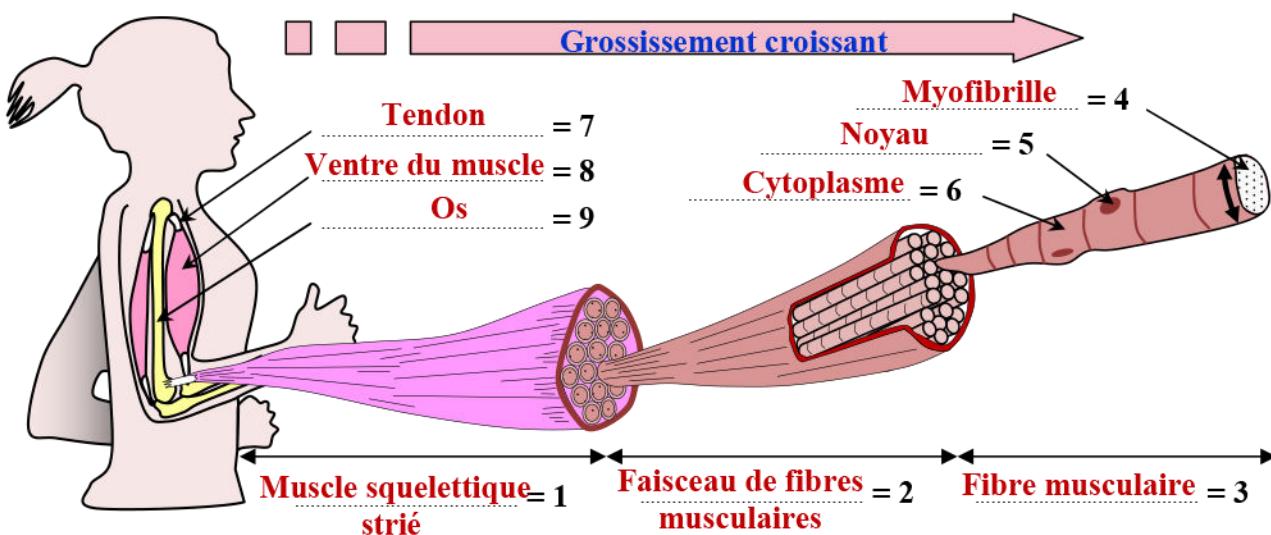
III – Structure et ultrastructure du muscle squelettique strié.

① Structure du muscle squelettique strié:

a) Observations à l'œil nu: (Voir document 9)

Document 9 : Structure du muscle strié squelettique.

Les muscles sont capables de réaliser des mouvements diversifiés grâce à la contractilité. Quelles sont donc les caractéristiques structurales qui confèrent au muscle la propriété de se contracter? La figure ci-dessous est un schéma explicatif présentant les différents niveaux d'organisation d'un muscle:



Annotez le schéma puis dégagiez les constituants essentiels du muscle squelettique strié, et déterminez quelques caractéristiques de ces constituants.

Les muscles sont fixés sur les os, on les qualifie alors de muscles squelettique.

La coupe transversale montre que le muscle est divisé en compartiments séparés par le tissu conjonctif.

Ces compartiments sont appelés faisceaux musculaires.

La dilacération du muscle montre qu'il a une structure fibreuse. Il est constitué de nombreuses fibres musculaires.

Chaque fibre musculaire est une structure fuselée de grande taille (Quelques centimètres). Elle est formée d'un cytoplasme appelé sarcoplasme, d'une membrane plasmique appelée sarcolemme, et de plusieurs noyaux plaqués au contact du sarcolemme.

La fibre musculaire apparaît occupée presque totalement de longs cylindres qu'on appelle myofibrilles, disposées parallèlement au grand axe de la cellule, ce qui donne à la cellule musculaire une striation longitudinale.

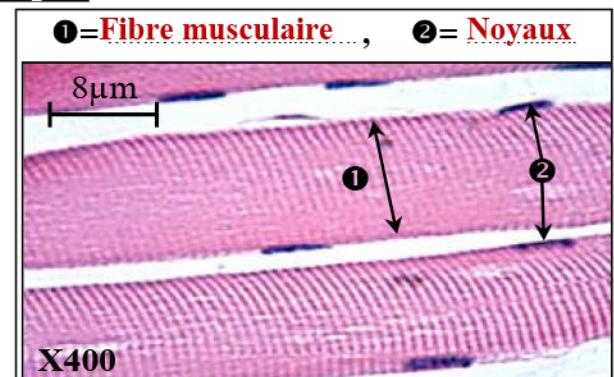
La fibre musculaire est une cellule géante plurinucléée, appelée syncytium.

b) Observations au microscope optique: (Voir document 10)

Document 10 : Structure du muscle strié squelettique.

La figure ci-contre représente une observation microscopique d'une coupe longitudinale d'une partie d'un muscle squelettique strié.

- 1) Décrivez la structure de la fibre musculaire et justifiez l'expression «muscle strié».
- 2) Donnez un dessin explicatif légendé de la structure de la fibre musculaire, du muscle squelettique strié.

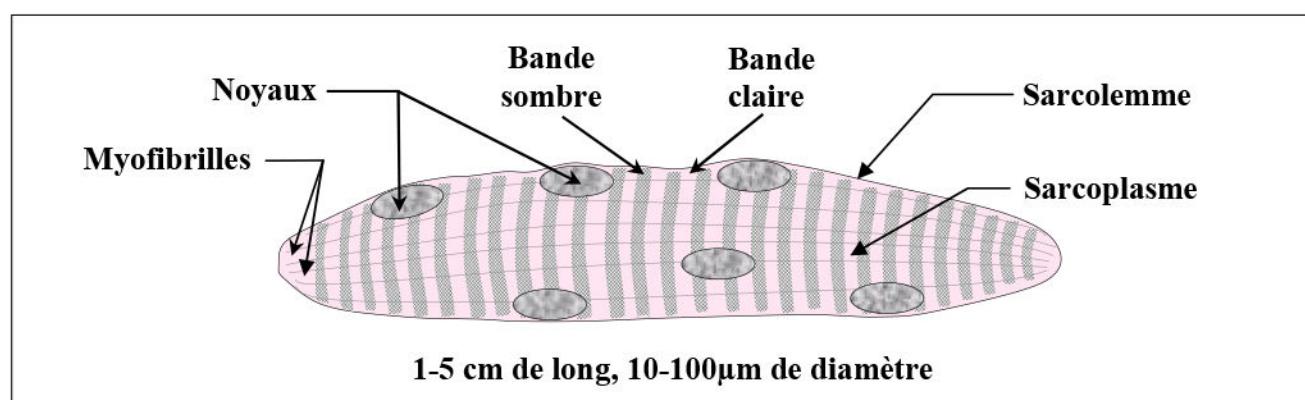


- 1) L'observation microscopique montre que le muscle est constitué de milliers de fibres musculaires, ce sont des cellules de formes allongées et plurinucléées.

La fibre musculaire de diamètre de 10 à 100 μm et de longueur pouvant atteindre plusieurs centimètres, est formée d'un sarcoplasme renfermant plusieurs noyaux distribués en périphérie.

A partir de l'observation microscopique on constate que le tissu musculaire montre des striations transversales en plus des striations longitudinales. C'est pour ça qu'on qualifie le muscle strié de muscle strié.

- 2) Dessin explicatif de la structure de la fibre musculaire strié:



② Ultrastructure du muscle squelettique strié:

Pour définir l'ultrastructure du muscle squelettique strié, on utilise le microscope électronique qui permet d'observer en détails les divers organites qui le compose.

a) Observations au microscope électronique:

Afin d'identifier les éléments impliqués lors de la contraction musculaire, on suggère d'exploiter les données du document 11:

Document 11: Ultrastructure du muscle squelettique strié.

La figure 1, représente une observation au microscope électronique d'une coupe longitudinale d'une fibre musculaire.

On exploitant les données de ce document, expliquer l'aspect strié que montrent les fibres musculaires à l'observation au microscope, puis annotez le schéma de la figure 3.

Figure 1: Observation microscopique

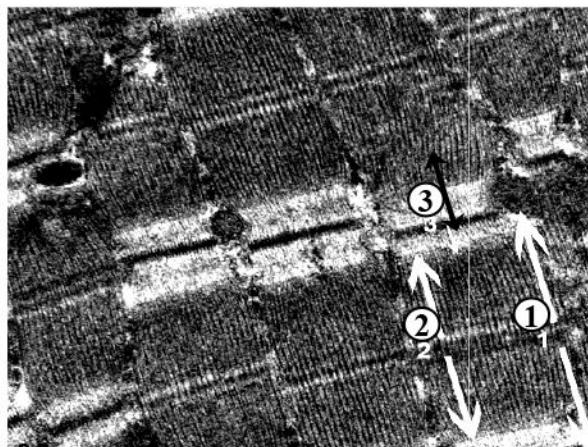


Figure 3: coupe d'une fibre musculaire

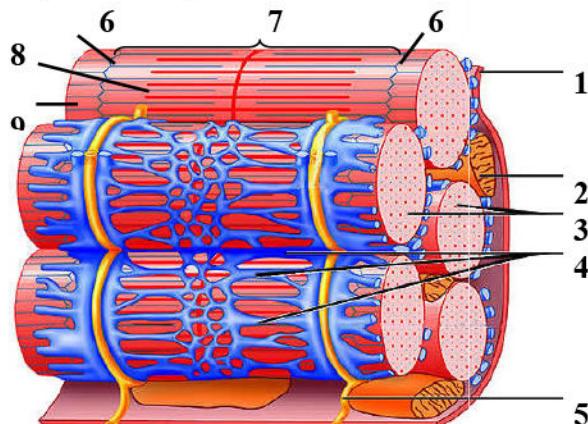
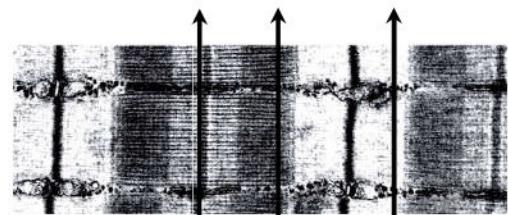
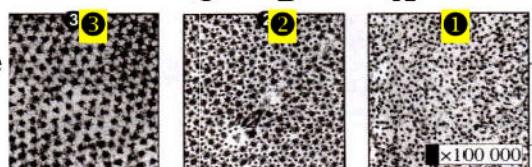


Figure 2: On fait des coupes transversales à plusieurs niveaux de la myofibrille: A, B et C. On obtient respectivement le résultat ①, ② et ③.

Coupe longitudinale de la myofibrille x15000



Coupes Transversales de la myofibrille x100000



Schémas explicatifs des Coupes longitudinale

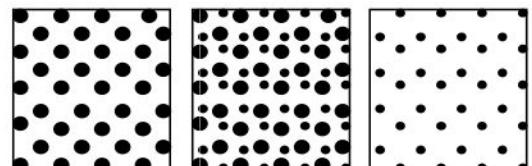
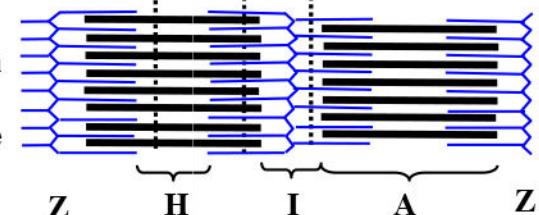


Schéma d'interprétation de la coupe longitudinale de la myofibrille



- ★ L'observation de la fibre musculaire au microscope électronique, montre que le sarcoplasme de cette cellule musculaire renferme plusieurs myofibrilles présentant une alternance de bandes claires (I) et de bandes sombres (A). C'est par l'alternance de ces bandes claires et sombres que les fibres musculaires doivent leur striation transversale.
- ★ D'après les résultats de la figure 2, on peut déduire que:
 - ⇒ Les myofibrilles sont constituées de deux types de myofilaments:
 - Des myofilaments épais constitués de myosine (diamètre 16 nm).
 - Des myofilaments fins constitués d'actine (diamètre 5 nm).

- ⇒ Les bandes claires sont constituées de myofilaments d'actine tandis que les bandes sombres sont formées de myofilaments d'actine et de myofilaments de myosine sauf au niveau de la bande H qui ne contient que des filaments de myosine.
- ⇒ Les myofibrilles sont constituées d'une succession d'unités structurales appelées sarcomères délimitées par deux stries Z successives.

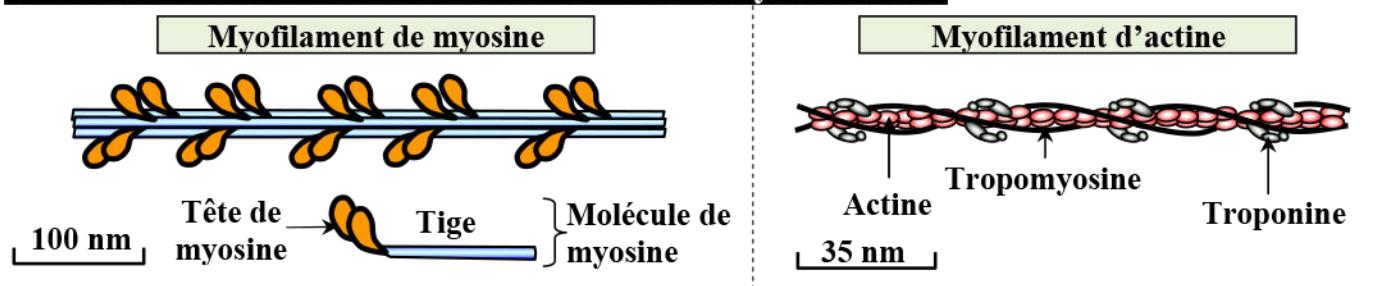
★ Légende de la figure 3:

1= sarcolemme ; 2= mitochondrie ; 3= myofibrilles ;
 4= réticulum sarcoplasmique ; 5= tubules transverse ; 6= strie Z ; 7= sarcomère ; 8= Myosine ; 9= actine.

- ★ La fibre musculaire renferme un organite spécialisé dans le stockage des ions Ca^{2+} c'est le réticulum sarcoplasmique, du glycogène, de la myoglobine (Protéine qui fixe l' O_2) et des mitochondries.

b) La structure moléculaire des myofilaments:

Document 12 : La structure moléculaire des myofilaments.



- ★ Les myofilaments fins sont constitués de trois types de protéines :

- L'actine : c'est le constituant essentiel, c'est une protéine globuleuse possédant à sa surface un site de liaison avec la molécule de myosine.
- La troponine : des protéines globuleuses.
- La tropomyosine : des protéines fibreuses.

- ★ Les myofilaments épais sont des faisceaux d'environ 200 molécules de myosine. Chaque molécule est constituée d'une tige et de deux têtes globuleuses.

IV – Mécanisme de la contraction musculaire.

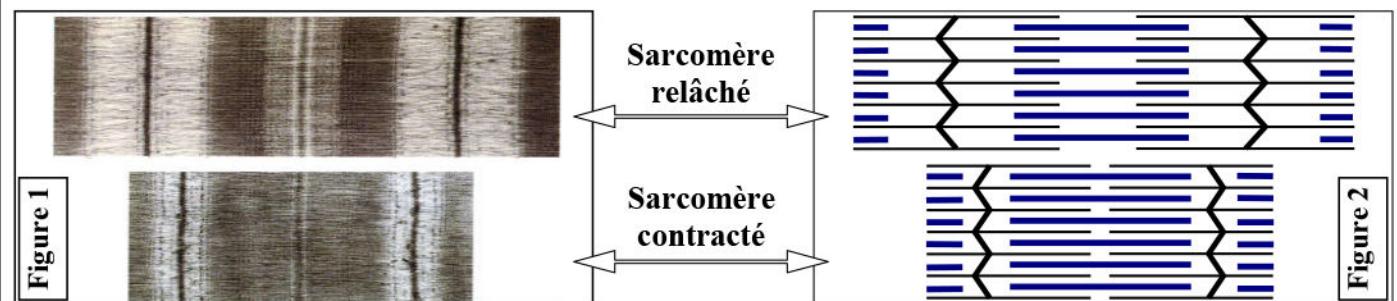
① En quoi consiste la contraction musculaire ?

- a) **Observations microscopiques:** (Voir document 13)

Document 13 : Mécanisme de la contraction musculaire.

Pour déterminer les modifications structurales responsables de la contraction musculaire, on procède à une congélation brutale de fibres musculaires au repos et en état de contraction. L'observation au microscope électronique, permet de réaliser les électronographies présentées par la figure 1.

La figure 2, est un schéma d'interprétation de l'observation microscopique.



Comparez l'aspect des sarcomères au repos et en état de contraction et précisez les changements qui affectent la myofibrille au cours de la contraction. Que pouvez-vous déduire de cette comparaison ?

b) Interprétation des résultats:

La comparaison entre un sarcomère contracté et un sarcomère au repos, montre que la contraction se traduit par :

- ✓ Un raccourcissement des sarcomères (rapprochement des stries Z).
- ✓ Une réduction de la longueur des bandes claires et de la bande H.
- ✓ Une constance des bandes sombres.
- ✓ La longueur des myofilaments reste constante.

Ceci prouve qu'il y a, au cours de la contraction, un glissement des myofilaments d'actine par rapport aux myofilaments de myosine. Le sarcomère est donc l'unité fonctionnelle de la fibre musculaire.

② Mécanisme du glissement des myofilaments.

a) Exigences de la contraction musculaire: (Voir document 14)

Document 14 : Les exigences de la contraction musculaires.

Pour préciser les conditions de la contraction musculaire, on réalise l'expérience suivante :

Des myofilaments isolées et placées dans un liquide riche en ATP et en Ca^{2+} . On additionne au milieu, le salyrgan (Un poison qui bloque l'hydrolyse de l'ATP) puis un chélateur (Une substance qui fixe les ions Ca^{2+} inhibant ainsi leur action) et on mesure la tension de la myofibrille. Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus.

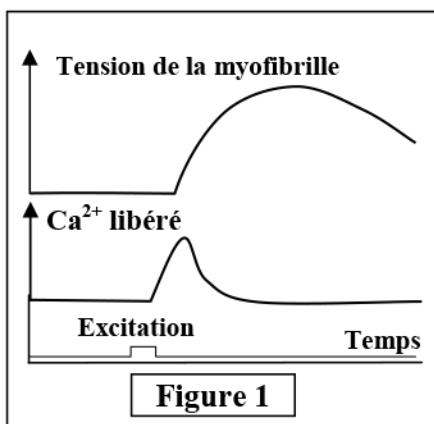


Figure 1

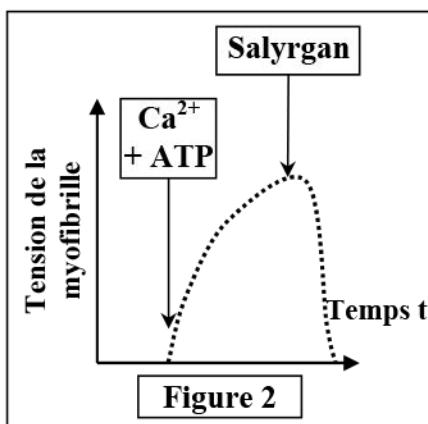


Figure 2

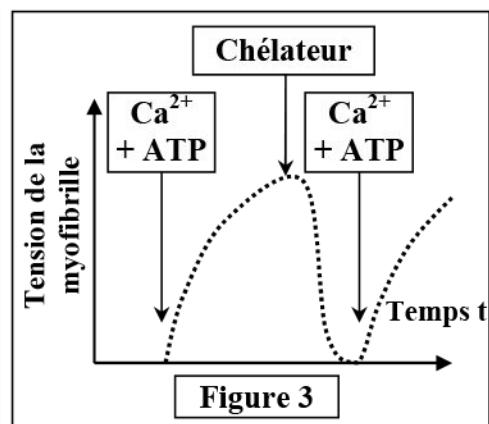


Figure 3

Analysez ces résultats et déduisez les conditions nécessaires à la contraction musculaire.

- ★ Figure 1: Au repos, la concentration du calcium dans le sarcoplasme est très basse. Immédiatement après l'excitation de la fibre musculaire, on constate une augmentation de la concentration de calcium dans le sarcoplasme, suivie d'une augmentation de la tension de la myofibrille (Contraction).
- ★ Figure 2: En présence d'ATP et d'ions Ca^{2+} , on observe une augmentation de la tension de myofibrille, après l'addition du salyrgan, la tension de la myofibrille diminue rapidement (arrêt de contraction). On explique l'arrêt de contraction après l'addition du salyrgan par l'absence d'hydrolyse d'ATP.
- ★ Figure 3: Après addition du chélateur, la tension de la myofibrille diminue rapidement (arrêt de contraction), même en présence d'ATP. On explique l'arrêt de la contraction après l'addition du chélateur par l'inhibition de l'action des ions Ca^{2+} .

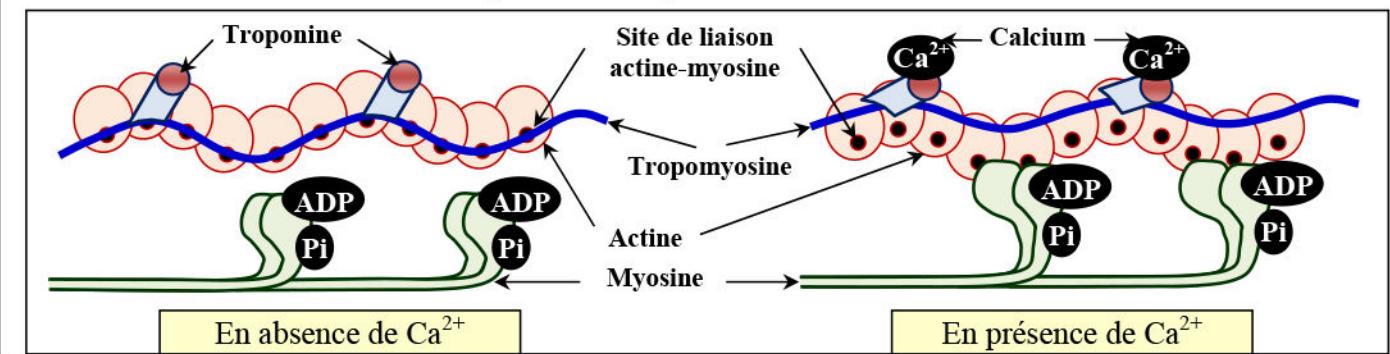
On déduit de ces résultats que la contraction musculaire ne peut être réalisée qu'en présence de deux éléments essentiels, l'ATP et le calcium (Ca^{2+}).

Quel est donc le rôle des ions calcium ? (Voir document 15)

Document 15 : Rôle des ions calcium au cours de la contraction musculaire.

En absence des ions Ca^{2+} (au repos), la tropomyosine cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine.

La fixation des ions Ca^{2+} sur la troponine entraîne le déplacement de la tropomyosine ce qui permet de démasquer le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine, et par suite, la fixation de myosine sur l'actine et la formation des complexes actomyosines.

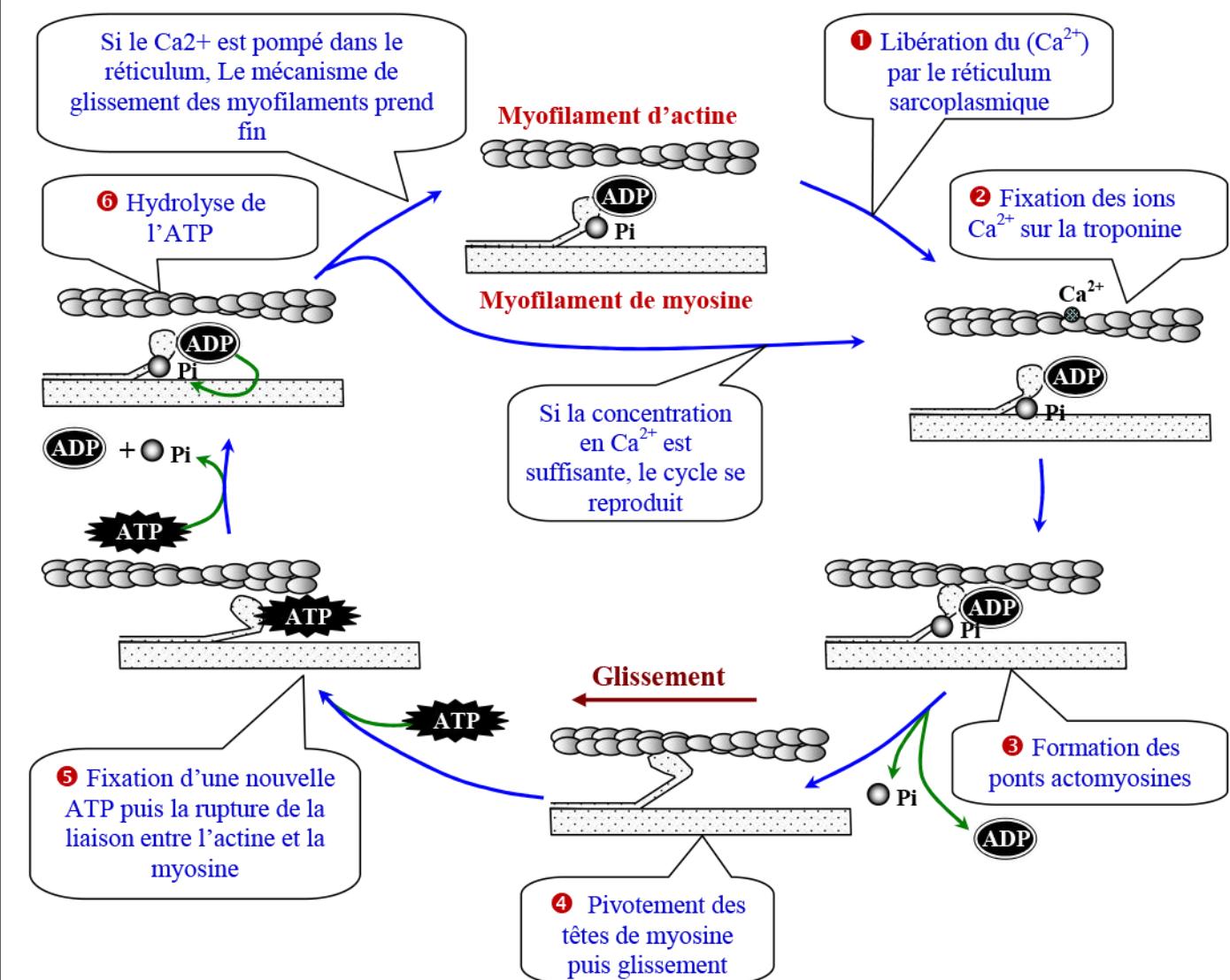


b) Mécanisme du glissement des myofilaments. (Voir document 16)

Document 16 : Les différentes étapes de la contraction.

Le schéma ci-dessous présente les différentes étapes de la contraction.

A partir de ce schéma, réalisez un résumé de synthèse sur les étapes de la contraction musculaire.



A la suite de l'excitation de la fibre musculaire, une cascade d'évènements survient provoquant le raccourcissement des myofibrilles:

Etape 1: Libération du calcium (Ca^{2+}) par le réticulum sarcoplasmique: En absence des ions Ca^{2+} (au repos), la tropomyosine cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine.

Etape 2: Fixation des ions Ca^{2+} sur la troponine entraînant le déplacement de la tropomyosine, ce qui permet la fixation de la myosine sur l'actine et la formation des complexes actomyosines (formation des ponts actomyosines).

Etape 3: Le Pi puis l'ADP se détachent, modifiant ainsi l'angle formé par les têtes de myosine fixées à l'actine ($90^\circ \rightarrow 50^\circ \rightarrow 45^\circ$) et donc entraînant le glissement des filaments d'actine sur les filaments de myosine. Ainsi, l'énergie chimique contenue dans l'ATP est convertie en énergie mécanique au niveau de chaque sarcomère entraînant son raccourcissement.

Etape 4: Seule la présence d'une nouvelle molécule d'ATP permet la rupture de la liaison entre l'actine et la myosine ($45^\circ \rightarrow 90^\circ$) et la formation d'un nouveau complexe myosine-ATP.

- Si la concentration en Ca^{2+} est suffisante, le cycle se reproduit.
- Au cours d'une contraction, le cycle se reproduit plusieurs fois en fonction du potentiel d'action émis par le motoneurone.
- Plus le nombre de cycles est grand, plus le raccourcissement est important.

Etape 5: Les canaux calciques du réticulum sarcoplasmique se ferment, le calcium est transporté activement dans le réticulum. Le mécanisme de glissement des myofilaments prend fin (relâchement).

V – Régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire:

① Mise en évidence d'un renouvellement d'ATP : (Voir document 17)

Document 17: Mise en évidence d'un renouvellement d'ATP.

Dans un muscle frais, la réserve en ATP est environ de 4 à 6 mmol/Kg, ce qui correspond à une quantité d'énergie de 0.17 à 0.25 KJ.

On évalue les dépenses énergétiques de l'organisme au cours de quelques exercices musculaires. Les résultats sont présentés par le tableau ci-dessous.

Type d'exercice	Quantité d'énergie dépensée en KJ/Kg de muscle
Cours de 100m	4.4
Une minute de marche	0.31

En exploitant les données du tableau de la figure 1, montrer la nécessité d'un renouvellement de l'ATP lors de la contraction musculaire.

D'une part on observe que les réserves des cellules musculaires en ATP sont très faibles, d'autre part le muscle utilise une quantité importante d'énergie qui dépasse les réserves présentes dans les cellules ce qui suggère un renouvellement rapide et permanent de l'ATP.

Comment l'ATP est régénérée au niveau du muscle ?

② Les voies de renouvellement de l'ATP :

a) Données expérimentales. (Voir document 18)

Document 18 : Les voies de renouvellement de l'ATP.

Trois expériences A, B et C sont réalisées, sur des muscles de grenouille. A chaque expérience, le muscle est soumis à des stimulations électriques intenses, à une fréquence élevée, ce qui provoque sa contraction. La durée des excitations est la même d'une expérience à l'autre.

- A : muscle n'ayant subi aucun traitement.
- B : muscle traité par une substance bloquant la glycolyse.
- C : muscle traité de façon à bloquer la glycolyse et l'utilisation de la phosphocréatine (Composé phosphaté riche en énergie et présent en abondance dans le muscle).

Constituants musculaires		Avant la contraction	Après la contraction		
			Expérience A	Expérience B	Expérience C
g/Kg de muscle frais	Glycogène	1.08	0.8	1.08	1.08
	Acide lactique	1	1.30	1	1
mmol/Kg	ATP	4 à 6	4 à 6	4 à 6	0
	Phosphocréatine	15 à 17	15 à 17	3 à 4	15 à 17

En analysant les données de ce tableau, dégager les voies métaboliques de la régénération de l'ATP, utilisés par le muscle en activité.

b) Analyse et interprétation.

Expérience A: Après la contraction, le taux de glycogène diminue, la proportion d'acide lactique augmente alors que le taux d'ATP et de phosphocréatine reste constant.

Le taux constant de l'ATP dans cette expérience, ne peut être expliqué que par le fait qu'il est constamment renouvelé. Cette régénération se fait par la fermentation lactique, où le glucose provient de l'hydrolyse du glycogène musculaire.

Expérience B: Après la contraction, seul le taux de phosphocréatine a diminué.

Ces résultats indiquent que la régénération de l'ATP dans ce cas se fait à partir de la dégradation de la phosphocréatine.

Expérience C: Après la contraction, seul le taux de l'ATP diminue jusqu'à épuisement du stock. Ces résultats indiquent que l'ATP n'a pas été renouvelée.

c) Conclusion : Les voies de renouvellement de l'ATP.

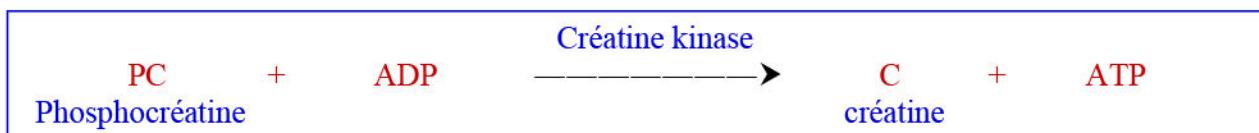
Lors d'un effort, une cellule musculaire consomme de très nombreuses molécules d'ATP. Elle régénère ces molécules grâce à trois voies métaboliques :

★ Voies anaérobies immédiates:

Au cours des premières minutes d'effort musculaires, la régénération de l'ATP met en jeu principalement les voies anaérobies, et se réalise sans formation d'acide lactique, d'où le nom de voie anaérobie alactique.

⇒ La voie de la phosphocréatine:

Cette voie met en jeu la phosphocréatine qui peut transférer un groupement phosphate à l'ADP selon la réaction suivante:



⇒ La voie de l'ADP:

Cette voie est permise grâce à une enzyme spécifique du muscle appelée la myokinase selon la réaction suivante :



★ Voies anaérobies de moyenne vitesse:

Lorsque la demande en ATP dépasse les possibilités par la voie immédiate, le processus de fermentation se met en route. Cette voie produit de l'acide lactique, d'où le nom de voie anaérobie lactique.

La dégradation du glucose se fait par fermentation lactique. Le glucose provient de l'hydrolyse du glycogène musculaire.

⇒ Hydrolyse du glycogène:



⇒ Fermentation lactique:



★ Voies aérobies lentes:

Lorsque la contraction musculaire se prolonge, l'organisme accroît l'alimentation en oxygène des muscles par augmentation du débit cardiaque. Donc c'est la respiration qui intervient dans cette voie pour régénérer l'ATP selon la réaction suivante:



③ Relation entre le type de métabolisme énergétique et intensité/durée de l'effort musculaire:
(Voir document 19)

Document 19 : Relation entre métabolisme énergétique et intensité/durée de l'effort musculaire.

Les muscles sont constitués de deux grands types de cellules : des fibres de type I et des fibres de type II (Voir tableau sur la figure 1).

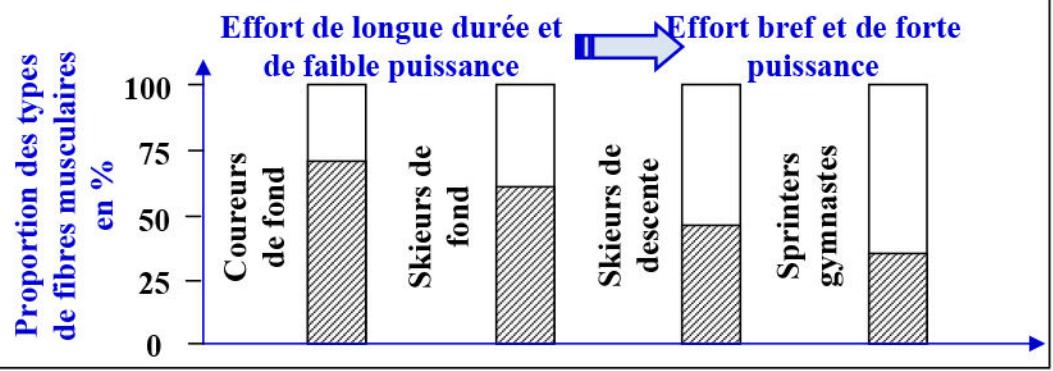
- 1) En exploitant le document 1, et à l'aide de vos connaissances, donnez les caractéristiques de chaque type de fibres musculaires en relation avec son métabolisme énergétique.

La figure 2, présente les pourcentages des deux types de fibres I et II chez différents athlètes.

- 2) En exploitant l'ensemble des figures de ce documents, montrez que les athlètes présentent des caractéristiques physiologiques associées aux particularités de leur sport.

Document 19 (Suite): Relation entre métabolisme énergétique et intensité/durée de l'effort musculaire.

Figure 1		Fibre de type I	Fibre de type II
Structure	Couleur	Rouge	Blanc
	Diamètre	Petit	Grand
	Présence de mitochondries	Forte	Faible
	Présence de capillaires	Forte	Faible
	Densité de fibres par unité motrice	Faible	Elevée
	Myosine ATPase	Faible	Elevée
Biochimie	Capacité glycolytique	Faible	Elevée
	Capacité oxydative	Elevée	Faible
	Vitesse de contraction	Lente	Rapide
Mécanique	Résistance à la fatigue	Résistante	Sensible
	Force musculaire	Faible	Importante



- La densité des capillaires irrigant les fibres de type I est forte que celle des fibres de type II. Comme le sang approvisionne les fibres musculaires en dioxygène, on peut penser que pendant un temps donné, les fibres de type I peuvent recevoir plus de dioxygène que les fibres de type II.

Bien approvisionnées en dioxygène, riches en mitochondries permettant l'utilisation de ce dioxygène, les fibres de type I doivent donc avoir un métabolisme aérobie assurant la régénération de l'ATP au fur et à mesure de son utilisation au cours de la contraction.

Le métabolisme aérobie des fibres de type II est relativement modeste et la capacité de régénération de l'ATP par ce type de métabolisme est réduite. On peut penser que les fibres de type II doivent donc avoir un métabolisme anaérobie comme la fermentation lactique.

- Les athlètes effectuant des efforts de longue durée (coureurs de fond, skieurs de fond) ont des muscles riches en fibres de type I (70 % et 60 % respectivement). En revanche les athlètes effectuant des efforts de plus courte durée (skieurs de descente et encore plus sprinters et gymnastes) ont des muscles riches en fibres de type II (55 et 65 % respectivement).

Il semble donc exister une corrélation entre le type de fibres musculaires et la durée de l'effort :

- ✓ Les fibres de type I au métabolisme aérobie faciliteraient les efforts de longue durée.
- ✓ Les fibres de type II au métabolisme surtout anaérobie les efforts de courte durée nécessitant une vitesse de contraction élevée.

Bilan:

Les athlètes effectuant des efforts prolongés ont des muscles riches en fibres de type I, au métabolisme aérobie. Or ce type de métabolisme ne permet pas de régénérer suffisamment d'ATP pour effectuer des efforts très intenses en peu de temps, mais assure la régénération de l'ATP pendant longtemps. Ce type de muscles est donc bien adapté à des efforts prolongés.

Les athlètes d'activités intenses mais de courte durée, ont des muscles riches en fibres de type II, au métabolisme surtout anaérobie qui permet de régénérer l'ATP pendant un temps court, mais devient inefficace dès que la durée de l'effort dépasse deux minutes. Là aussi les caractéristiques des muscles sont adaptées à la nature de l'effort réalisé par l'athlète.