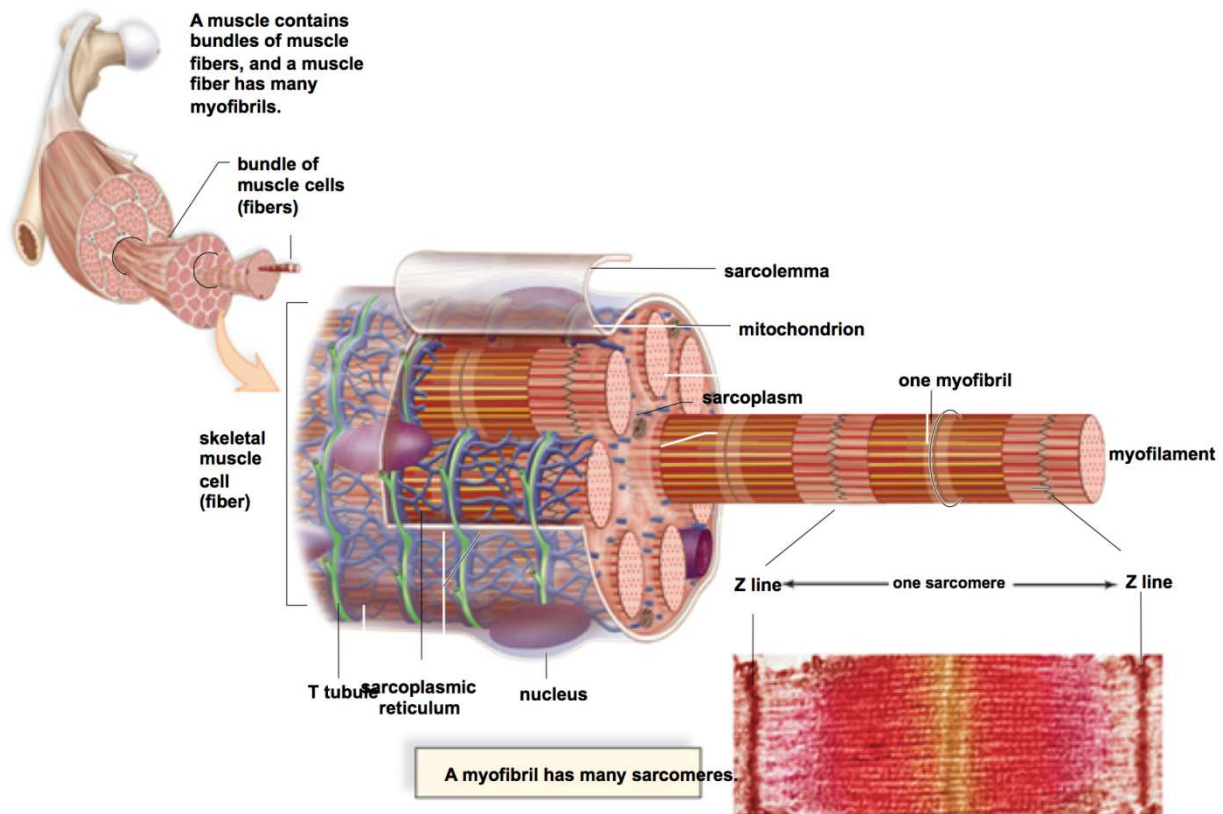


Chapitre 2 : Rôle du muscle strié dans la conversion de l'énergie.



Au cours des réactions biochimiques de la respiration et de la fermentation, une bonne partie de l'énergie potentielle contenue dans les molécules organiques est convertie en énergie potentielle contenue dans l'ATP. Cette énergie est restituée à l'occasion de l'hydrolyse de l'ATP au cours du transport actif, des synthèses cellulaires (synthèse de différentes substances) et du travail mécanique (mouvement).



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

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

Plan du chapitre :

Unité 1 : Enregistrement des contractions musculaires.

Unité 2 : Structure et ultrastructure du muscle squelettique strié.

Unité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire.

Unité 4 : Les voies métaboliques assurant la régénération de l'ATP.

Unité 1 : Enregistrement des contractions musculaires :

La contraction des muscles est sous la commande du système nerveux. En effet les fibres musculaires se contractent suite à la réception des messages nerveux issus des centres nerveux, et qui arrivent à travers les fibres nerveuses motrices.

La contraction provoque le mouvement des os au niveau des articulations. Ce qui génère le mouvement.

- Comment peut-on enregistrer les contractions musculaires ?
- Quel lien existe-t-il entre les types de contractions musculaires et les messages nerveux ?

► Chez une grenouille, on procède à la destruction de l'encéphale et de la moelle épinière.

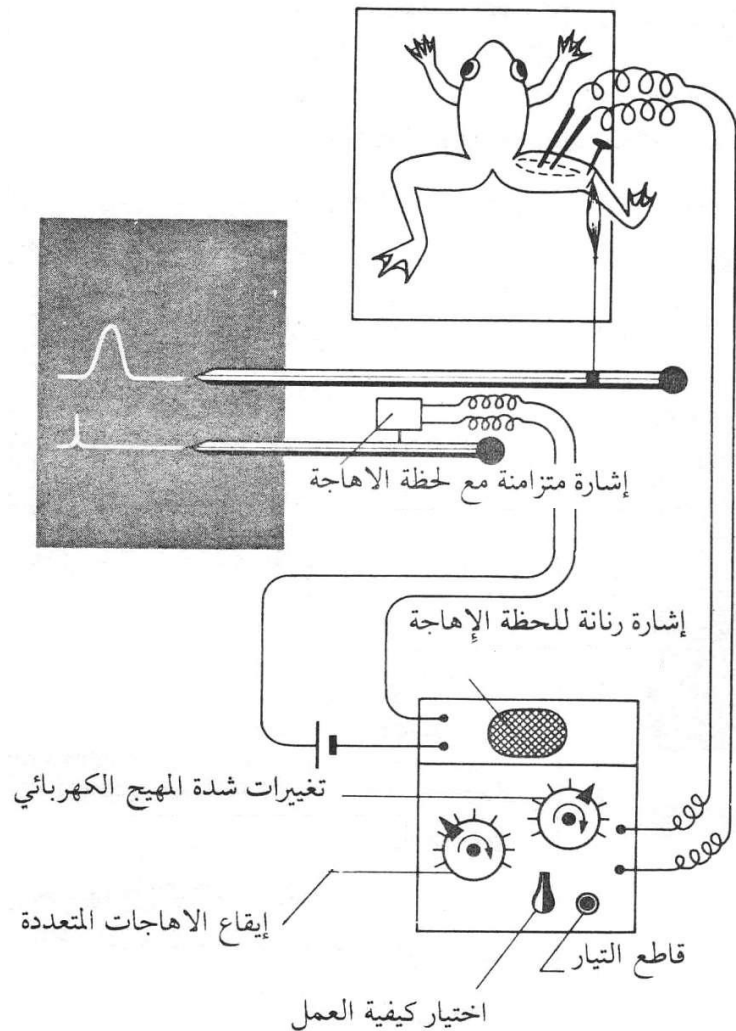
► La dissection du membre postérieur permet de dégager le muscle gastrocnémien et le nerf sciatique.

► Avec une épingle on fixe le genou sur une plaque.

► On sectionne le tendon d'Achille et on le relie, à travers un fil, au système d'enregistrement.

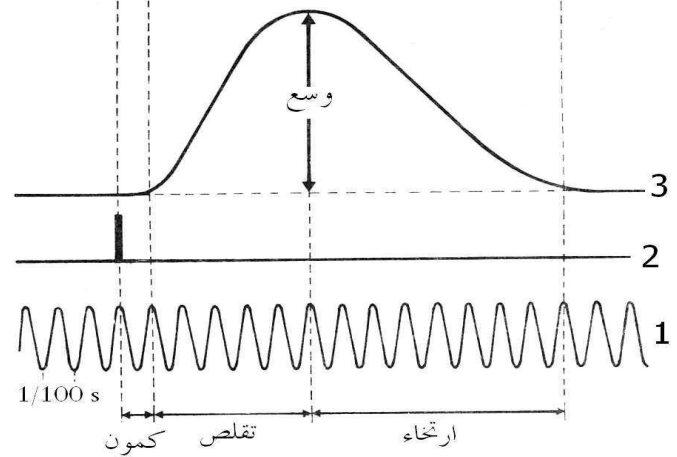
► Lors de sa contraction, le muscle supporte une masse faible et constante. On parle de contraction isotonique.

► On applique des excitations à travers le système excitateur, et grâce au stylet inscripteur, on enregistre le myogramme sur un cylindre tournant à vitesse déterminé.



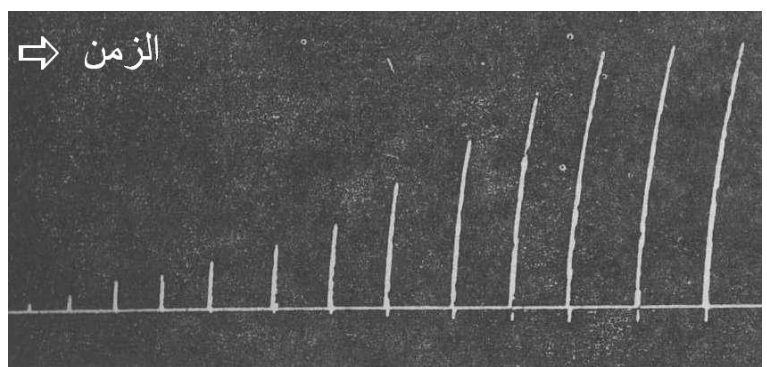
Document 1 : Dispositif expérimental pour étudier la contraction musculaire chez la grenouille

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

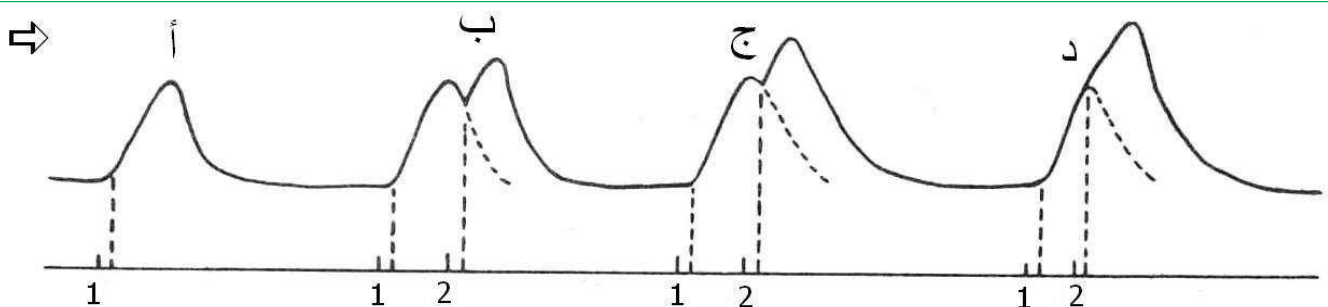


Document 2 : Secousses musculaires isolée : 1- L'échelle du temps ; 2- Artéfact de stimulation ; 3- Myogramme.

On applique des stimulations électriques au niveau du nerf sciatique, tout en gardant le cylindre immobile. Après le premier enregistrement, on fait tourner le cylindre manuellement de quelques millimètres et on répète la simulation ... L'opération se répète plusieurs fois avec des stimulations à intensité croissante. Le résultat figure sur l'image ci-contre.



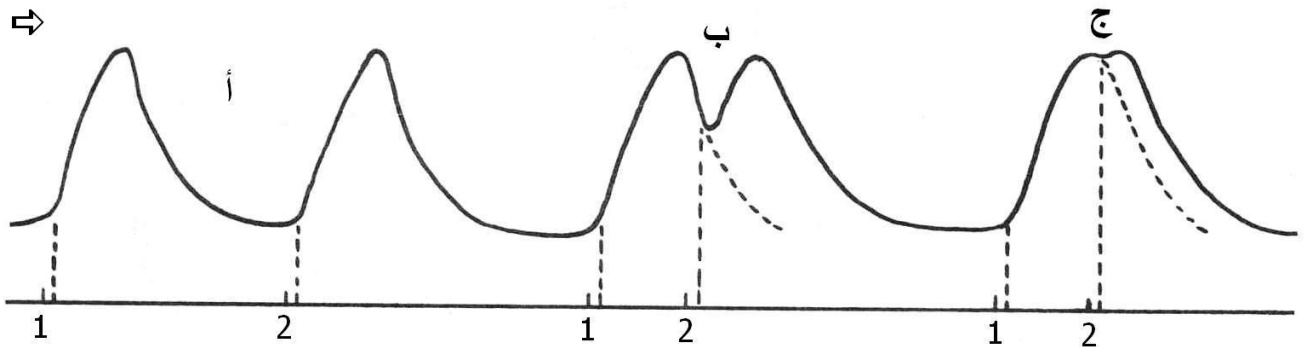
Document 3 : La relation entre l'intensité de la stimulation et l'amplitude de la contraction musculaire.



Le cylindre tournant à vitesse constante, on applique une stimulation efficace, mais qui ne donne pas l'amplitude maximale de la contraction musculaire dans le cas de la secousse isolée

- a- Simulation unique.
- b- Deux stimulations successives : La deuxième est appliquée lors de la phase du relâchement correspondant à la première secousse.
- c- Deux stimulations successives : La deuxième survient lors de la phase du relâchement, avec diminution de l'écart temporel entre les deux stimulations.
- d- Deux stimulations successives : La deuxième survient lors de la phase de contraction.

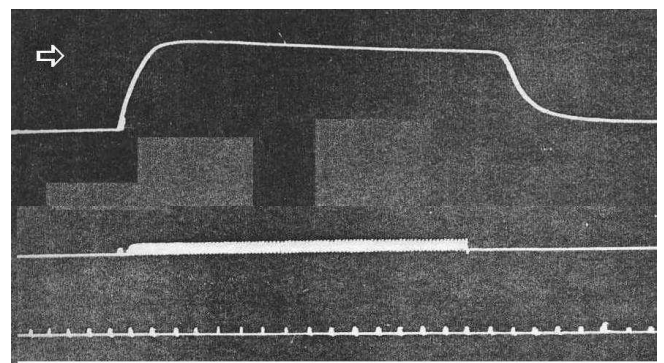
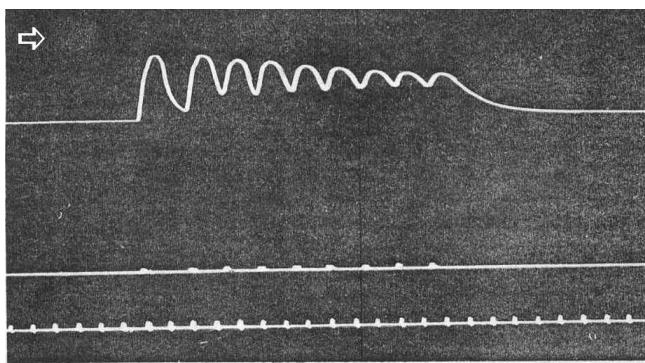
Document 4 : L'effet de deux stimulations successives avec une intensité qui ne donne pas l'amplitude maximale de la contraction musculaire.



Le cylindre tournant à vitesse constante, on applique une stimulation dont l'intensité provoque l'amplitude maximale de la contraction du muscle.

- .a- Deux stimulations successives éloignées dans le temps.
- .b- Deux stimulations successives : La deuxième survient lors de la phase de relâchement correspondant à la première secousse.
- .c- Deux stimulations successives : La deuxième survient à la fin de la phase de contraction correspondant à la première secousse.

Document 5 : L'effet de deux stimulations successives dont l'intensité donne l'amplitude maximale de la contraction musculaire.

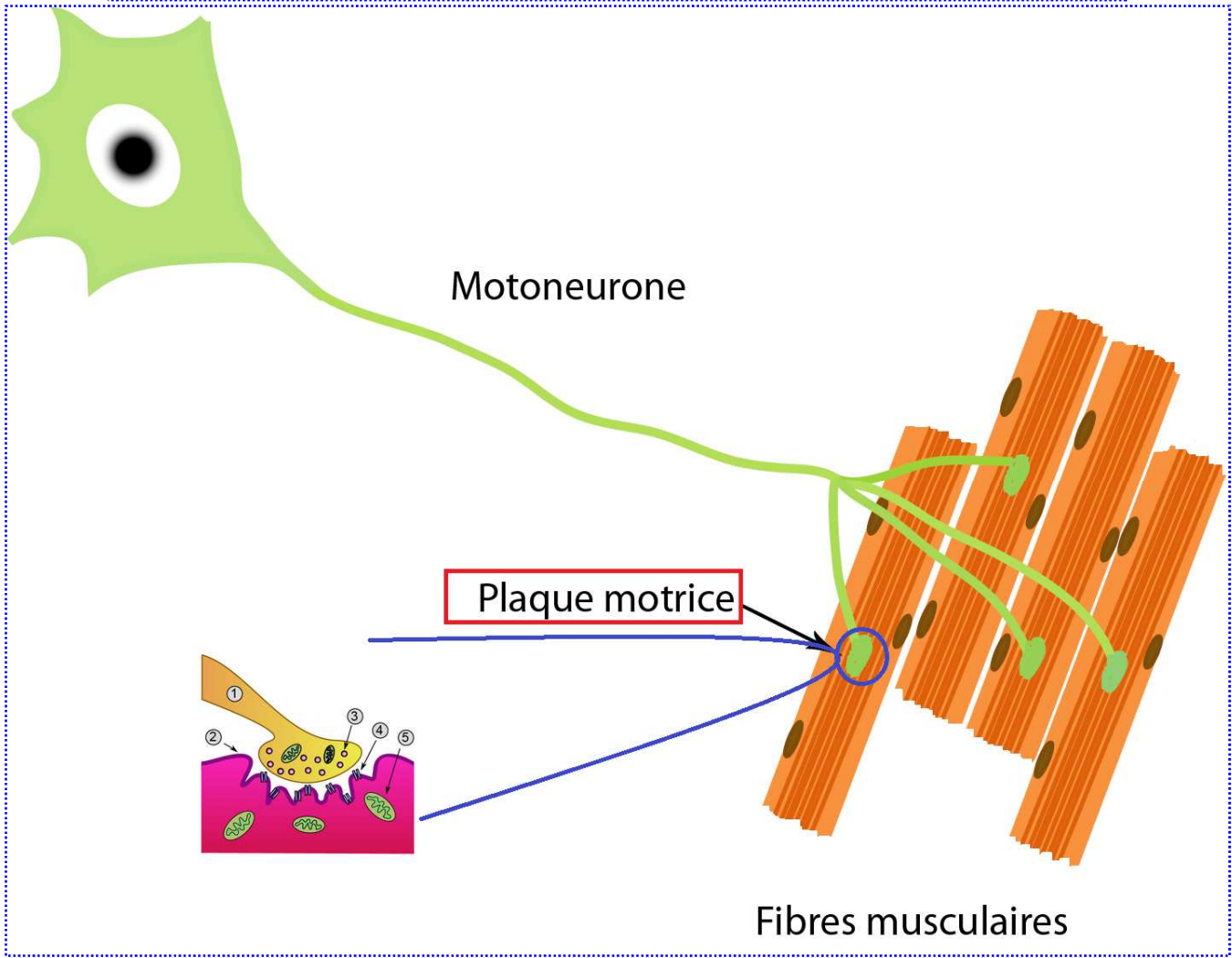
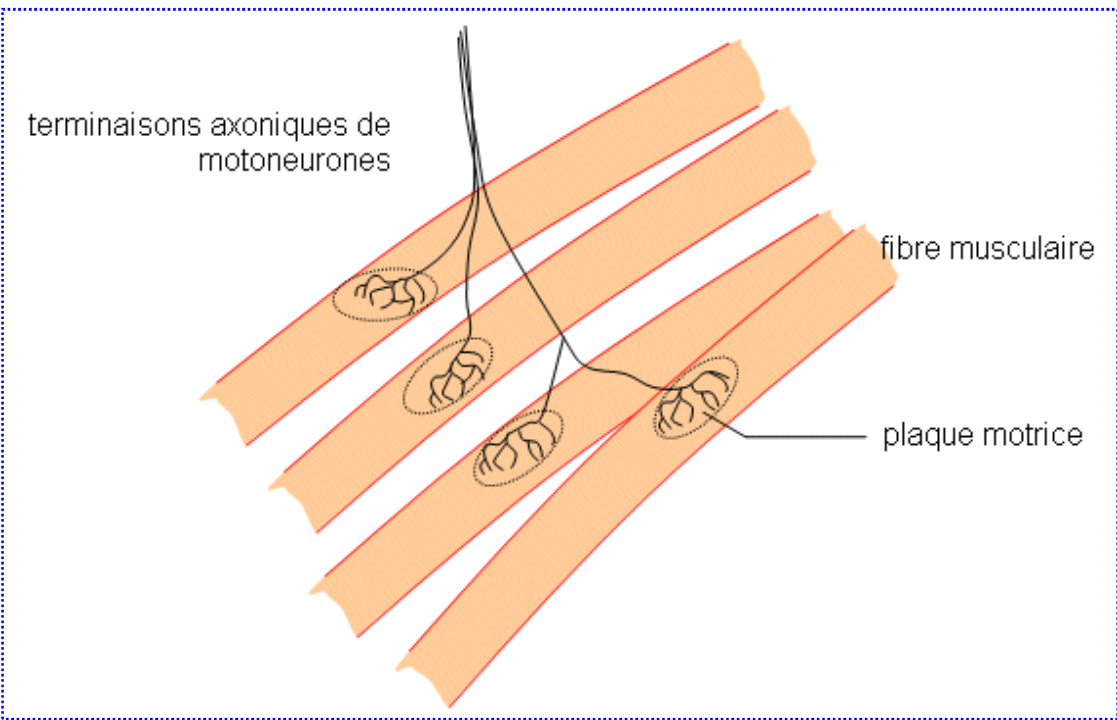


On applique des stimulations qui donnent l'amplitude maximale de la contraction musculaire. Les stimulations successives se répètent avec une fréquence de 10 à 15 stimulations par seconde (figure de gauche), ou avec une fréquence de 25 à 30 stimulations par seconde (figure de droite). Les secousses successives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

Documents 6 : Le téτανos.

Exploitation des documents :

- .1- Déterminez les phases de la secousse musculaire isolée, et indiquez la durée de chaque phase, et interprétez la phase de latence.
- .2- Comment peut-on expliquer la variation de l'amplitude de la contraction musculaire en fonction de l'intensité de la stimulation ? (document 3).
- .3- Comment peut-on interpréter les différences des résultats respectifs des expériences du document 4 et du document 5 ?
- .4- À partir du document 6, donnez une définition au téτανos.



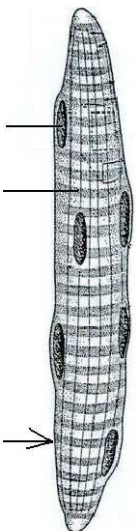
Unité 2 : Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique.

Les muscles sont liés aux os par les tendons. Leur contraction assure le mouvement des os au niveau des articulations. Les contractions des muscles assurent aussi le maintien des différentes positions du corps.

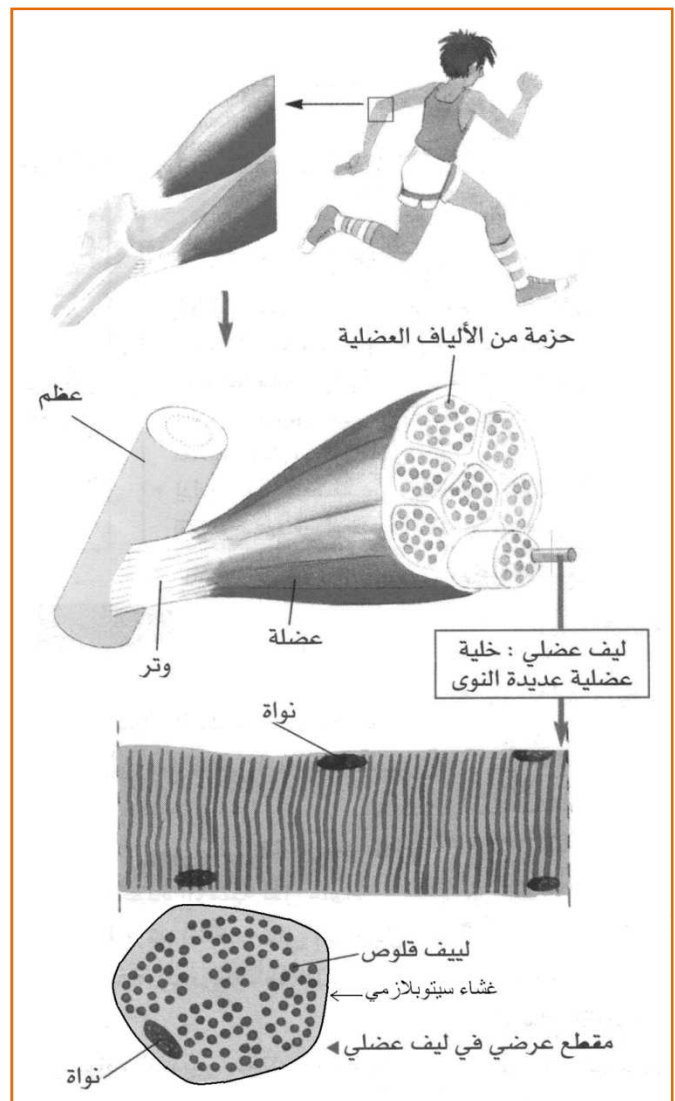
- Quelle est la structure du muscle squelettique strié et des fibres musculaires le constituant ?
- Quelles sont les caractéristiques qui font de la fibre musculaire une cellule spécialisée dans la fonction de contraction ?

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

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

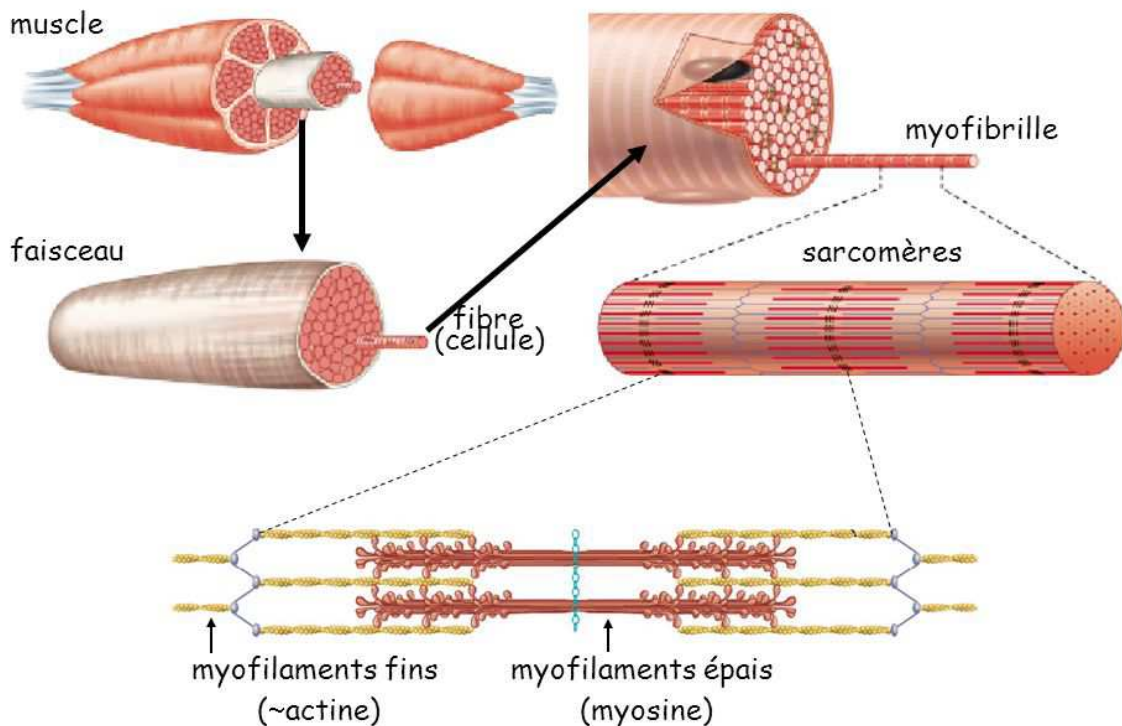
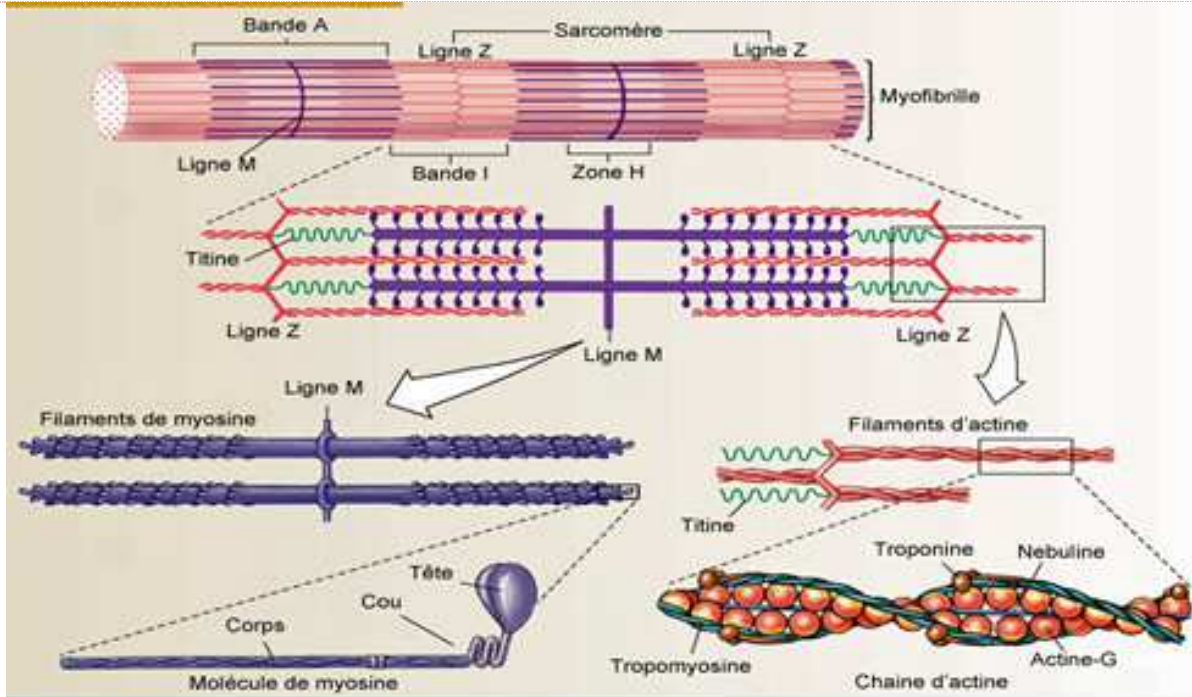


La majorité du volume du cytoplasme est occupée par des centaines ou des milliers de cylindres parallèles au grand axe de la fibre. Ce sont les myofibrilles qui se caractérisent par la contractilité. Au niveau du cytoplasme on trouve aussi plusieurs noyaux ; des mitochondries ; des réserves de glycogène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

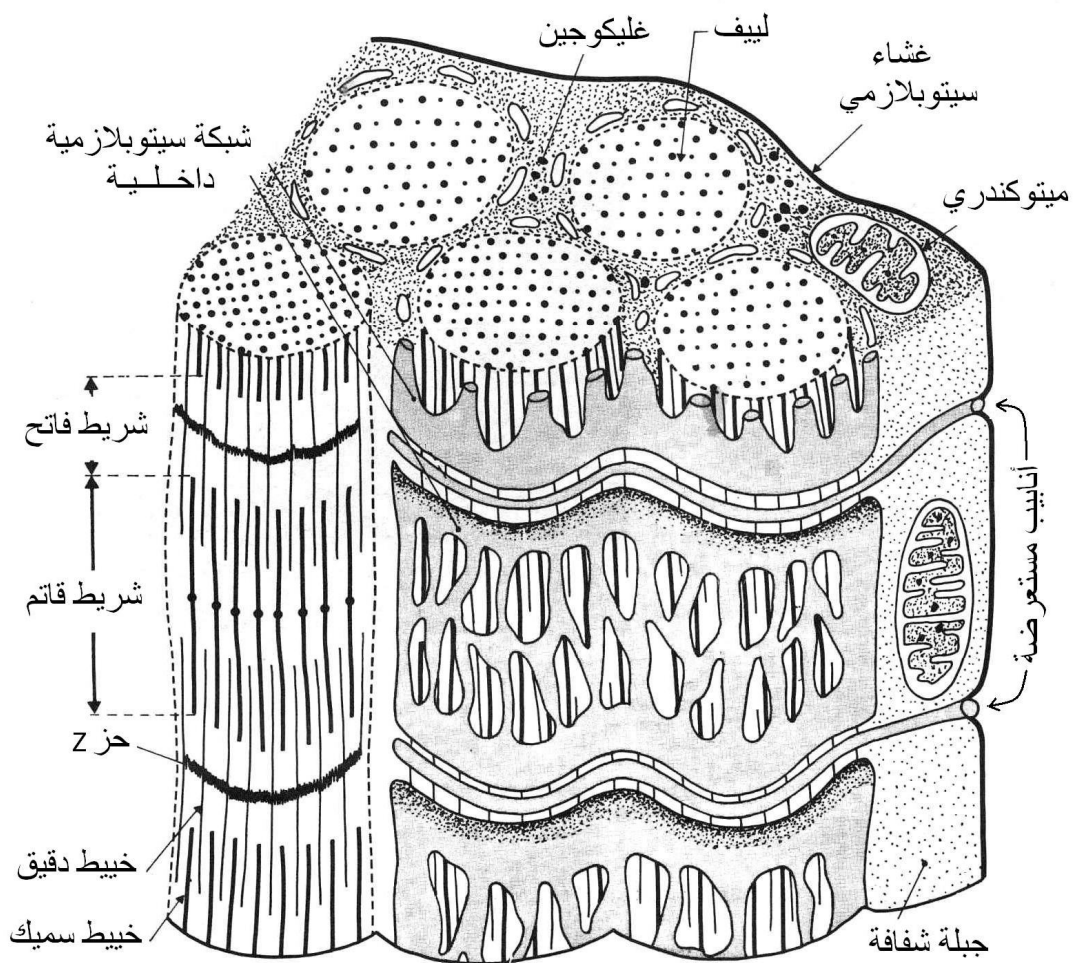
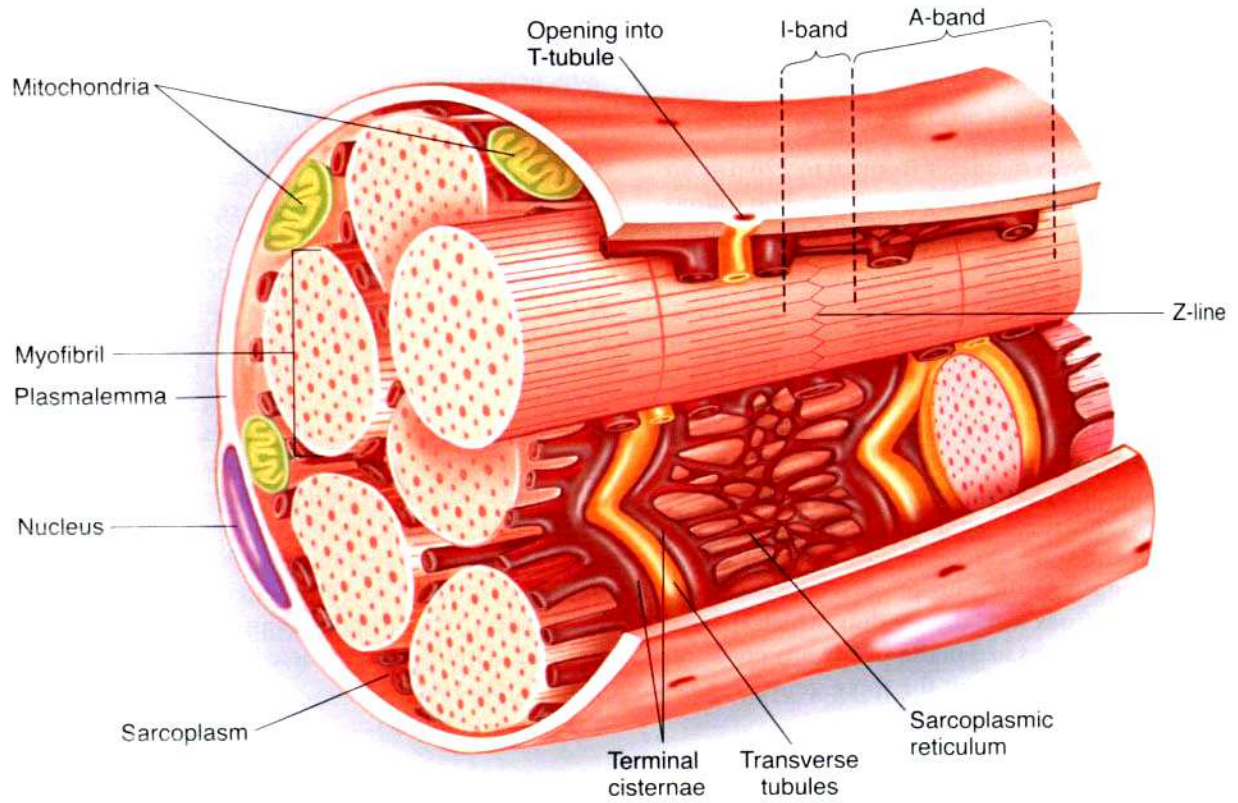


Document 1 : L'organisation du muscle squelettique strié.

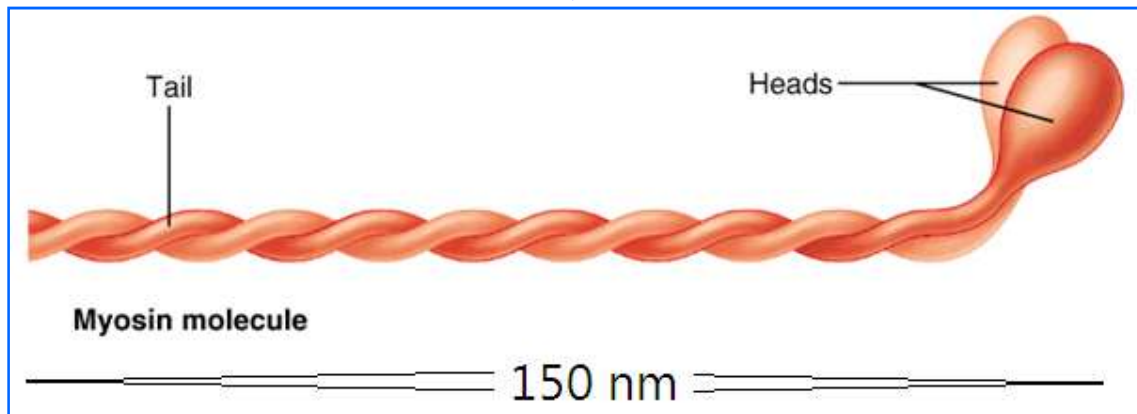
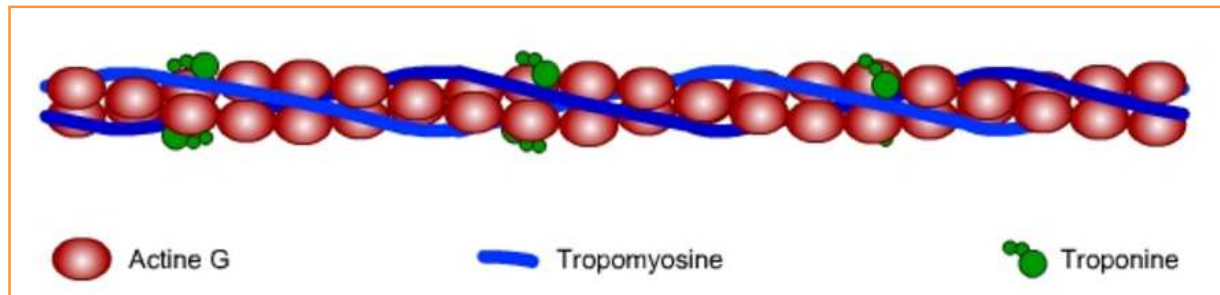
Au microscope électronique, la myofibrille présente une alternance de bandes claires (I) et de bandes sombres (A). Au milieu de la bande claire (I), on trouve ce qu'on appelle la strie Z. Au milieu de la bande sombre (A), on trouve une bande relativement claire. C'est la bande H. Chaque myofibrille est constituée d'un faisceau de myofilaments épais et de myofilaments fins. La zone comprise entre deux stries Z successives constitue l'unité fonctionnelle de la myofibrille. C'est le sarcomère. Les myofilaments fins sont constitués essentiellement d'une protéine dite « actine ». Les myofilaments épais sont constitués d'une autre protéine dite « myosine »



Document 2 : Ultrastructure des myofibrilles.



Document 3 : Blocs - diagrammes représentant une portion de la fibre musculaire.



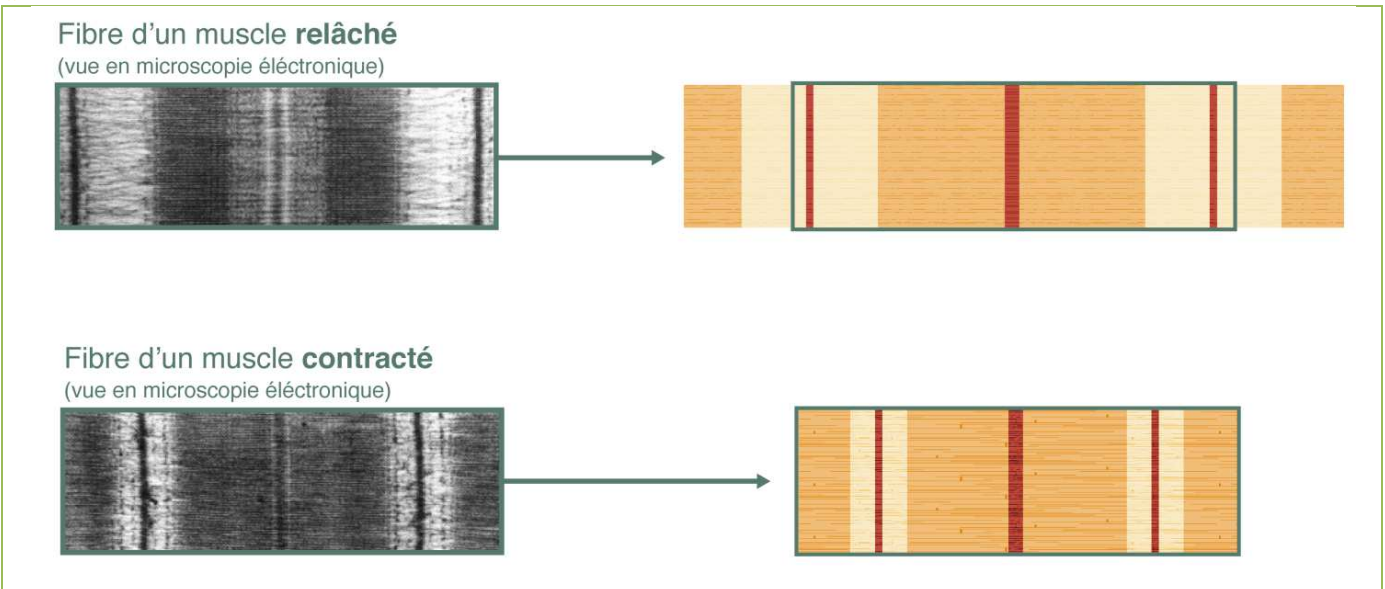
Exploitation des documents :

- .1- Relever des documents ce qui montre que la fibre musculaire est, d'une part une cellule, et d'autre part, une cellule adaptée à la fonction de contraction.
- .2- Représenter la myofibrille avec un schéma annoté.
- .3- Le cytoplasme de la fibre musculaire se caractérise par un réseau dense de vésicules limitées par une membrane. C'est le réticulum endoplasmique (RE). On trouve aussi des invaginations de la membrane plasmique qui constituent des tubes un doigt de gant. Ces tubes dits « tubes transversaux » s'enfoncent profondément dans le cytoplasme, et entourent les myofibrilles.
Proposez une hypothèse expliquant la densité de ces structures cytoplasmique.
- .4- Au cours de la contraction musculaire, les longueurs des myofilaments d'actine et de myosine ne changent pas.
Proposez une hypothèse expliquant ce qui se passe au niveau du sarcomère lors de la contraction (utilisez un schéma explicatif).

Unité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire.

Les observations au microscope électronique et les techniques biochimiques ont permis d'étudier les mécanismes intimes de la contraction musculaire, au niveau des filaments d'actine et de myosine.

- Que révèlent les observations au microscope électronique ?
- Comment l'interaction actine-myosine permet-elle de convertir l'énergie libérée au cours de l'hydrolyse de l'ATP en énergie mécanique (mouvement) ?

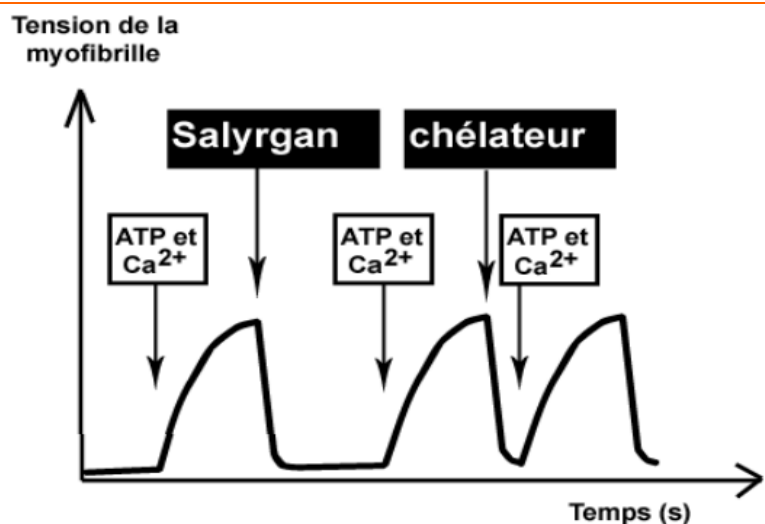


On fait diminuer rapidement la température de certaines fibres musculaires en état de relâchement, et en état de contractions. L'observation au microscope électronique montre la différence de l'aspect des myofibrilles dans les deux situations.

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

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

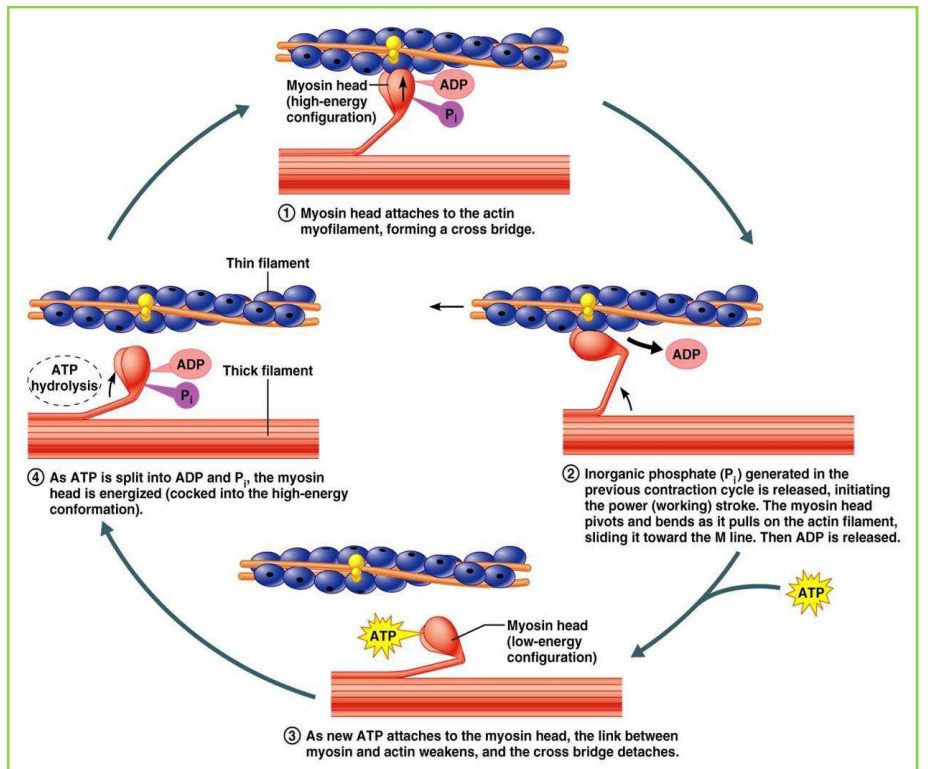
Un chélateur : Une substance qui fait précipiter les ions Ca^{++} qui ne reste plus en solution dans le milieu.



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

- Le myofilament de myosine (myofilament fin) est un faisceau de 200 molécules de myosine. Chaque molécule de myosine est constituée d'une queue et d'une double-tête. Les têtes émergent à la surface du myofilament. Ces têtes ont la capacité de se fixer sur l'actine.

- Le myofilament d'actine est constitué de deux chaînes spiralées enroulées l'une autour de l'autre. Chaque chaîne est une succession de protéines globulaires. Ce sont les molécules d'actine. Le



myofilament fin comporte aussi des molécules de troponine et de tropomyosine.

- Au cours de la contraction, une succession d'événements cyclique a lieu entre les myofilaments d'actine et les myofilaments de myosine.

- α-** La tête de myosine est fixée à l'actine et fait un angle de 45° par rapport à l'axe du myofilament fin.

- β-** La tête de myosine fixe l'ATP et se sépare de l'actine.

- γ-** L'hydrolyse de l'ATP fait basculer la tête de myosine vers la position perpendiculaire par rapport à l'axe du myofilament fin (la tête de myosine est rechargée en énergie).

- δ-** La tête de myosine se fixe sur l'actine. Cette fixation nécessite la présence Ca⁺⁺. En effet, en absence de Ca⁺⁺, les molécules de tropomyosine masquent les sites d'actine sur lesquels vont se fixer les têtes de myosine. En présence de Ca⁺⁺, ces ions se fixent sur la troponine qui agit sur la tropomyosine qui effectue un mouvement qui libère lesdits « sites ». Si les ions Ca⁺⁺ disparaissent, les sites sont de nouveau masqués.

- ε-** Avec la libération de l'ADP, la tête de myosine pivote pour revenir à la position de 45° par rapport à l'axe du myofilament d'actine. Ce dernier est tiré vers l'axe du sarcomère (libération de l'énergie par la tête de myosine → mouvement).

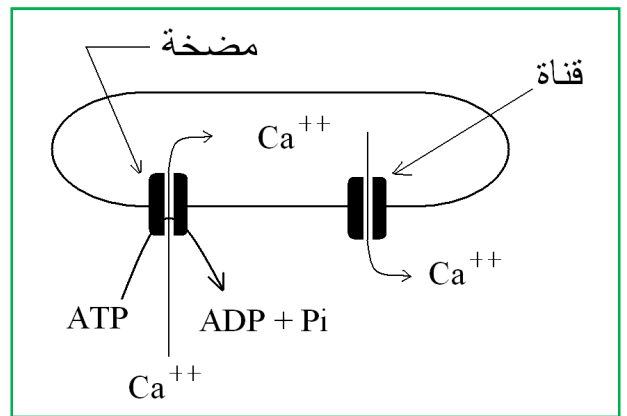
- ▶ La tête de myosine effectuée 5 cycles par secondes. Ce qui provoque le glissement des myofilaments les uns par rapport aux autres, avec une vitesse de 15 μm/s

- ▶ Au cours de ce glissement, la longueur du sarcomère diminue car les molécules de myosine sont disposées de façon symétrique, les têtes vers les lignes Z et queues vers l'axe du sarcomère.

- ▶ Le muscle est actif, c'est-à-dire il consomme de l'énergie, au cours de la contraction. Le relâchement est un mouvement passif car il est lié à la contraction des muscles antagonistes.

Document 3 : Rôle des myofilaments dans l'élaboration de l'énergie mécanique.

► En partant de la synapse neuromusculaire, le potentiel d'action se propage à travers la membrane plasmique de la fibre musculaire (sarcolemme) pour atteindre les membranes du réticulum endoplasmique via les tubules transverses (tubules T). La perturbation électrique provoque l'ouverture de canaux à Ca^{++} voltage-dépendants. Ainsi, les ions Ca^{++} passent de la lumière des citernes du RE vers le hyaloplasme (cytosol).



► La présence des ions Ca^{++} est indispensable à la liaison actine-myosine (formation du complexe actomyosine). Pour que la contraction soit régulée, des pompes ATP-dépendantes font revenir les ions Ca^{++} vers la lumière des vésicules du réticulum endoplasmique.

Document 4 : Importance du message nerveux pour la contraction musculaire.

Exploitation des documents :

- .1- À partir du document 1, comparez l'épaisseur de la bande A avant et après la contraction. Représentez les deux situations avec un schéma montrant les myofilaments.
- .2- Interprétez les résultats de l'expérience du document 2.
- .3- Au niveau de l'expérience du document 2, peut-on avoir le même résultat si l'on utilise uniquement les myofilaments d'actine ou bien les myofilaments de myosine ? Déduisez deux caractéristiques du complexe actomyosine.
- .4- Relever de documents 3 les données qui montrent qu'il y a une conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique (mouvement) au cours de la contraction musculaire.
- .5- À partir du document 4, montrez comment le message nerveux est-il traduit au niveau de la fibre musculaire.

Unité 4 : Les voies métaboliques assurant la régénération de l'ATP.

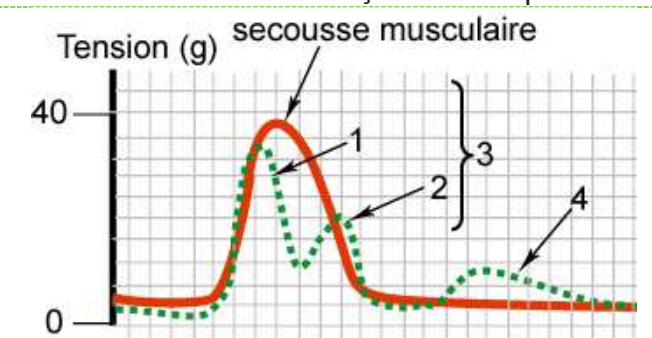
La contraction musculaire utilise l'énergie libérée par hydrolyse de l'ATP. Les quantités d'ATP et d'ADP+Pi dans la cellule sont très limitées. D'où la nécessité d'une régénération permanente et régulée.

- Comment peut-on mettre en évidence la régénération de l'ATP ; et quelles sont les voies métaboliques qui l'assurent ?
- Quelle est la relation entre la régénération de l'ATP et le dégagement de chaleur qui accompagne la contraction musculaire ?

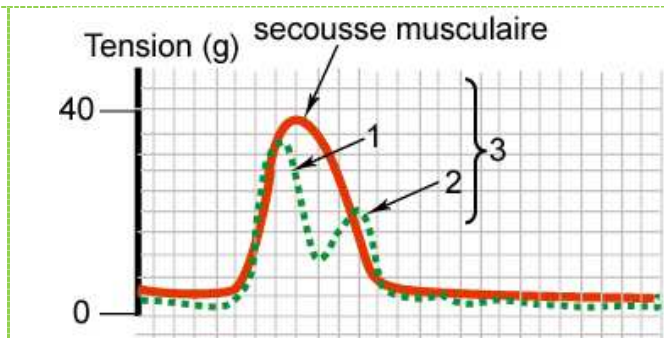
- Au niveau de la lèvre supérieure du cheval, on a analysé le sang veineux et le sang artériel d'un muscle ; et on a constaté ce qui suit :
 - Au cours de la contraction musculaire, il y a augmentation du volume du sang qui traverse le muscle, de la quantité de CO₂ rejetée, et des quantités d'oxygène et de glucose consommées.
- Chez l'homme, on a remarqué que la quantité d'oxygène consommée augmente avec l'intensité de l'exercice musculaire, pour se stabiliser à un certain niveau. À partir de cette étape, on détecte l'apparition de l'acide lactique dans le sang.

Document 1 : les phénomènes chimiques accompagnant la contraction musculaire.

- Avec un dispositif expérimental adéquat, on peut enregistrer la contraction musculaire et le dégagement de chaleur qui l'accompagne. La chaleur est dégagée par des réactions biochimiques exothermiques. Le graphique ci-contre montre les résultats obtenus.
- Si on met le muscle dans un milieu aérobie, le muscle se contracte, mais la chaleur retardée diminue de façon remarquable.



Dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu riche en oxygène (milieu aérobie).



Dégagement de la chaleur par un muscle placé dans un milieu pauvre en oxygène (milieu anaérobie) .

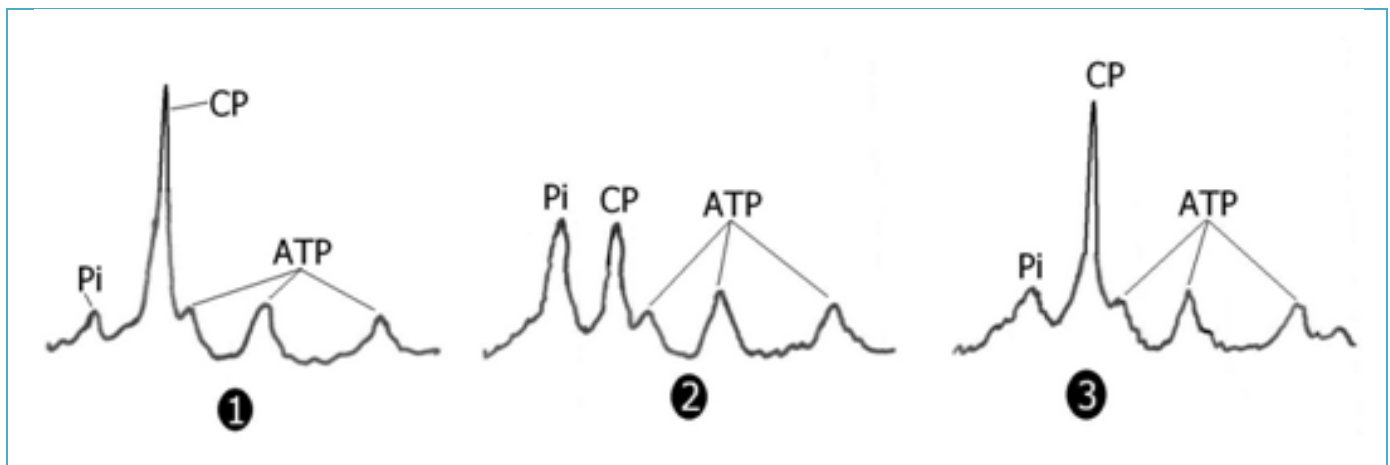
.1 : Chaleur de contraction .2 : Chaleur de relâchement .3 : Chaleur initiale .4 : Chaleur retardée.

Document 2 : Mise en évidence de la chaleur qui accompagne la contraction musculaire

Les constituants chimiques	Avant la contraction	Après la contraction
Glycogène	11 g/Kg	8 g/Kg
ATP	≈ 5 mmol/kg	≈ 5 mmol/kg

- Au cours d'un exercice musculaire intense, la vitesse de l'utilisation de l'ATP par l'organisme peut atteindre 0,5 kg /min.
- Les réserves d'un muscle frais en ATP sont estimées à environ 5 mm/Kg, c'est-à-dire 0,32 % de la masse du muscle.
- Une fibre musculaire renouvelle l'ensemble de ses réserves d'ATP en une minute. C'est-à-dire elle hydrolyse et synthétise environ 10 million de molécules d'ATP par seconde.

Document 3 : L'ATP dans le tissu musculaire.

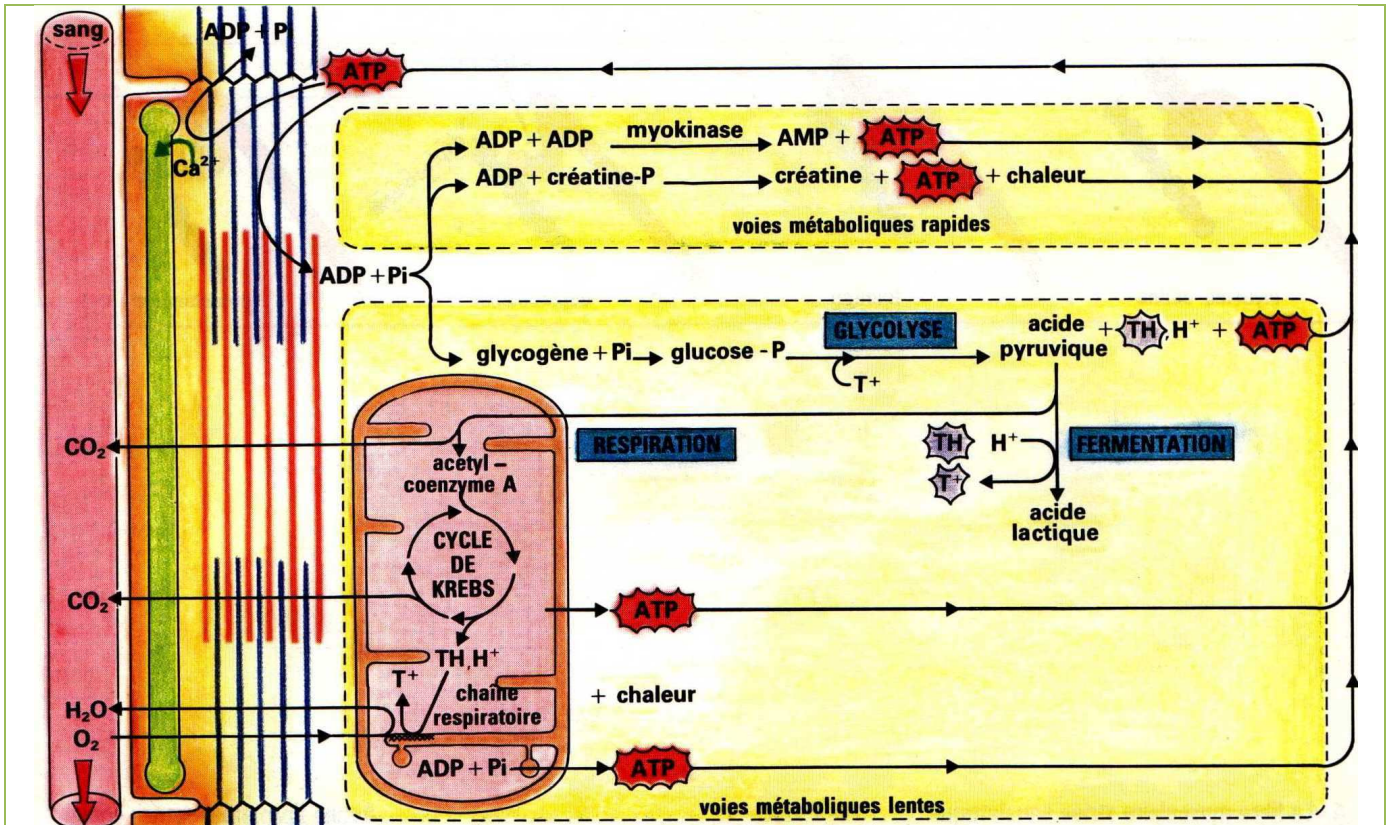


Grâce aux techniques de la résonance magnétique nucléaire, on peut suivre l'évolution rapide des contractions d'ATP, de Pi et de la phosphocréatine (PC) au sein de la fibre musculaire.

- ➊ Avant l'activité musculaire
- ➋ À la fin d'une activité musculaire intense
- ➌ Après 4 minutes de repos

Les pics au niveau des enregistrements représentent les quantités respectives des trois substances. L'ATP est représentée par trois pics.

Document 3 : Évolution des quantités d'ATP, de phosphocréatine (PC), et de Pi dans la fibre musculaire, au cours de l'exercice musculaire.



I - Voie métabolique rapide anaérobie alactique (chaleur initiale) : Régénération de l'ATP par la phosphocréatine (PC) et par l'ADP.

II - Voie métabolique moins rapide anaérobie lactique : Fermentation lactique (utilisation du glucose sanguin et hydrolyse du glycogène cytoplasmique).

La fermentation lactique

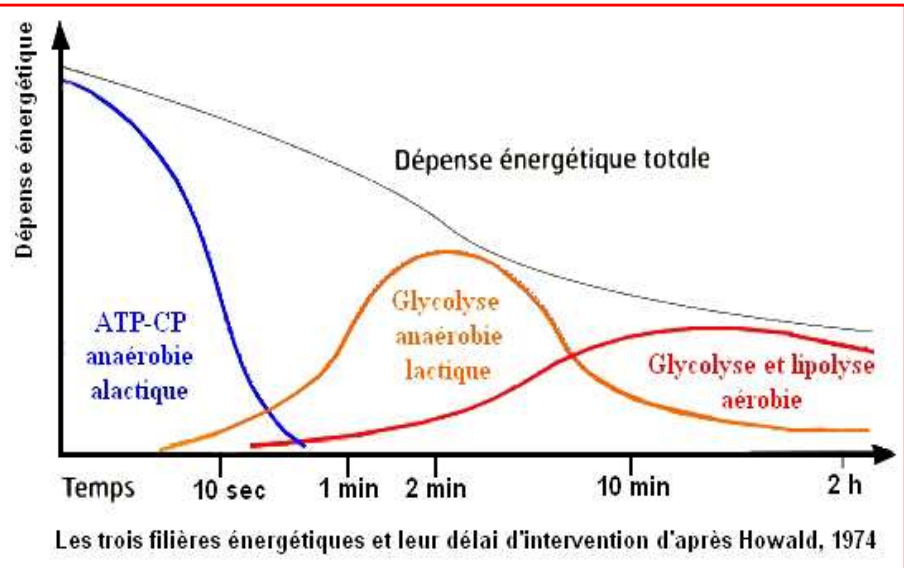
intervient surtout lorsque l'intensité du travail musculaire est très élevée de sorte que la circulation sanguine n'assure plus les quantités suffisantes d'oxygène que nécessite la respiration. Le manque est comblé par la fermentation lactique.

Au repos, l'acide lactique est transféré vers le foie où il se transforme en acide pyruvique puis en glycogène.

III-Voie métabolique lente aérobie (chaleur retardé) : C'est tout simplement la voie de la respiration cellulaire.

Remarque : L'ATP régénéré par la respiration cellulaire et la fermentation lactique permet de régénérer l'ADP et reformer le stock de phosphocréatine (PC).

Document 4 : Les voies métaboliques de régénération de l'ATP



Exploitation des documents :

- 1- Interpréter les résultats expérimentaux du document 1.
- 2- Proposez une hypothèse à propos de l'origine de la chaleur initiale et de la chaleur retardée (documents 2).
- 3- Relever du document 3 ce qui montre que la concentration de l'ATP dans la cellule est une constante régulée.
- 4- Analysez et interprétez les enregistrements du document 3.
- 5- Relevez des documents 3 et 4, ce qui montre que la fibre musculaire est une cellule spécialisée adaptée à une forte consommation d'énergie.
- 6- A partir du document 4, déterminez l'origine de la chaleur initiale et de la chaleur regardée.
- 7- Représentez, avec un schéma simplifié, les voies métaboliques qui assurent la régénération de l'ATP pour la fibre musculaire.

