

## Chapitre 2 : Rôle du muscle strié squelettique dans la conversion d'énergie

### ☑ Introduction :

Les muscles squelettiques striés assurent la posture et la motricité du corps grâce à leurs contractions. Au cours de la contraction, les muscles transforment l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique avec un dégagement de chaleur.

L'étude du rôle du muscle dans la conversion de l'énergie consiste à :

- Montrer que la cellule musculaire est l'unité structurelle et fonctionnelle de la contraction musculaire à travers l'étude de sa structure et ultra-structure.
- Mettre en évidence le mécanisme de contraction musculaire et la conversion de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique.
- Déterminer les différentes voies de régénération de l'ATP dans la cellule musculaire.

### I- Enregistrement des contractions musculaires (Myogrammes):

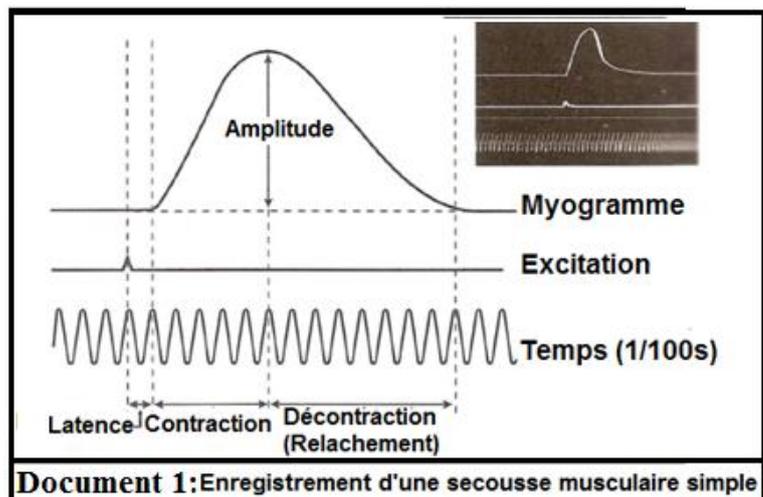
#### 1- Réponse à une seule excitation efficace :

Le muscle strié squelettique est dit **contractile**, car sa longueur diminue (se contracte) en réponse à une excitation (électrique, chimique, thermique...).

L'enregistrement d'une contraction musculaire s'effectue à l'aide d'un appareil nommé myographe, l'enregistrement obtenu est lui nommé **myogramme**.

In vitro, si on applique une seule excitation on obtient une seule réponse nommée **secousse musculaire simple**, caractérisée par trois phases :

- ✓ La **phase de latence** : laps de temps entre le moment de l'excitation et le moment où le muscle commence la contraction.
- ✓ La **phase de contraction** : Elle s'étend jusqu'au sommet de la courbe, lorsque le raccourcissement du muscle est à son maximum.



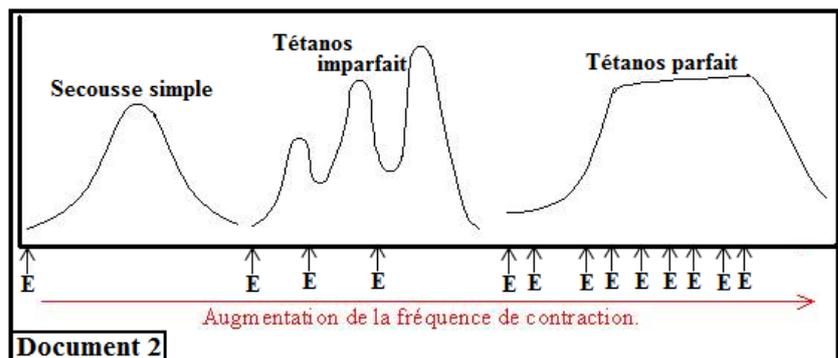
- ✓ La **phase de décontraction** : s'étend du sommet du myogramme jusqu'au moment où le muscle retrouve sa longueur initiale.

## 2- La réponse musculaire à des excitations répétées :

Voir : Exercice « **Enregistrement des contractions** »

La réponse d'un muscle à des excitations répétées de même intensité, va dépendre du temps qui sépare deux excitations successives :

- ✓ Si l'intervalle entre deux excitations successives est supérieur à la durée de la secousse simple, on va obtenir deux (ou plusieurs) secousses isolées.
- ✓ Si la deuxième excitation survient pendant la période de décontraction de la première secousse, celle-ci ne s'achève pas et on obtient une seconde réponse d'amplitude supérieure à la première liée à celle-ci, on parle de sommation partielle des deux secousses. Dans ces conditions, si le muscle est soumis à une série d'excitation, on aura une réponse en forme de vague appelée tétanos imparfait.
- ✓ Si la deuxième excitation survient pendant la période de contraction de la première secousse, on obtient alors une fusion complète des deux secousses (sommation totale des deux secousses), aboutissant à une seule réponse plus ample et plus longue qu'une secousse simple. Dans ces conditions, si le muscle est soumis à une série d'excitation, on aura fusion complète des réponses appelée tétanos parfait.



## II- Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique :

### 1- Structure du muscle :

Le muscle strié squelettique est le muscle qui se fixe au squelette et permet le mouvement de celui-ci dans une direction bien définie grâce à sa fonction essentielle de contraction sous contrôle du système nerveux central.

Le muscle squelettique est formé de plusieurs faisceaux de fibres musculaires entourés chacun de membranes conjonctives qui s'unissent pour former les tendons qui attachent les muscles aux os.

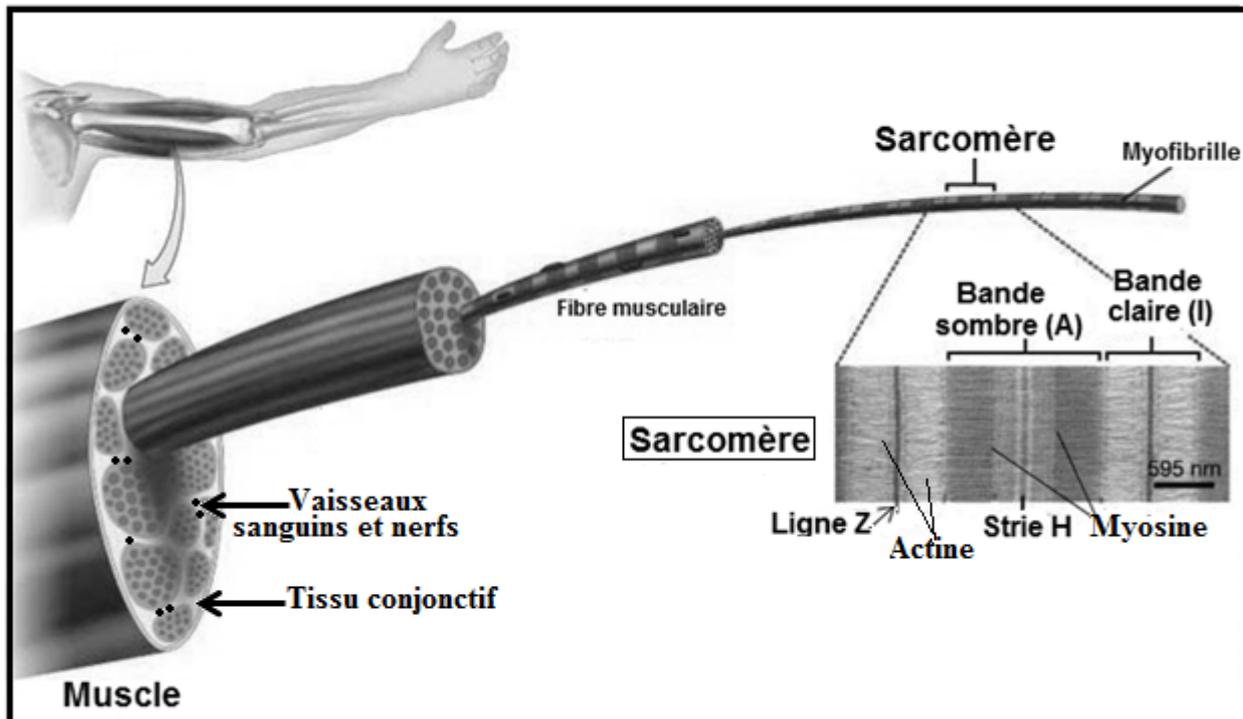
### 2- Ultrastructure du muscle :

Chaque fibre musculaire striée est considérée comme étant une cellule musculaire, on y trouve :

- Le Sarcoplasme (équivalent du cytoplasme dans les cellules) avec à l'intérieur des mitochondries, le réticulum sarcoplasmique (? : Un organite cellulaire

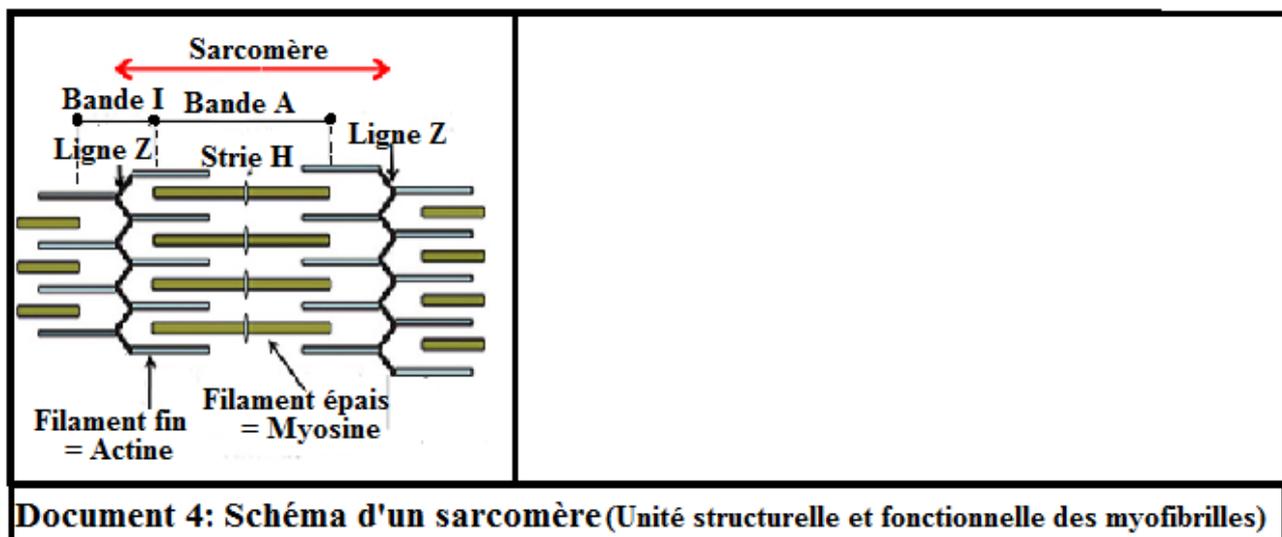
pouvant retenir des substances dans des vésicules) et une réserve importante de glycogène. La cellule est limitée par une membrane appelée sarcolemme,

- Une multitude de noyaux tout au long de la cellule (cellule plurinucléée),
- Des myofibrilles constituées par une série d'unités appelées **Sarcomère**, alterne des stries claires (bandes claires) et de stries sombres (bandes sombres). Les bandes claires correspondent à des zones contenant des filaments fins constitués par de l'actine, et les bandes sombres correspondent à des filaments épais de myosine.

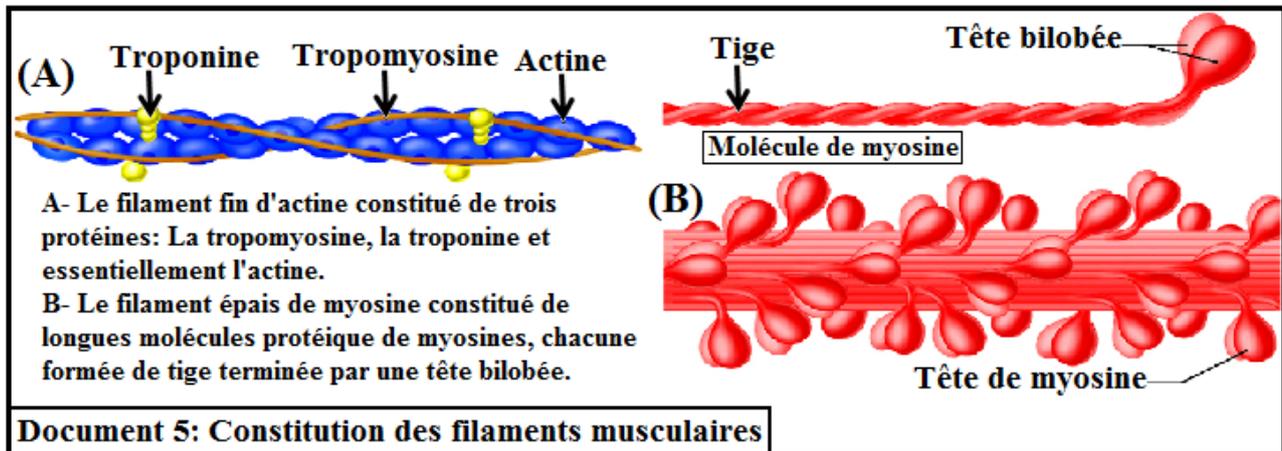


**Document 3: Structure et ultrastructure du muscle strié squelettique**

- Activité 1 :** Dessinez dans la zone ci-dessous un schéma simplifié de sarcomère.



**Document 4: Schéma d'un sarcomère (Unité structurelle et fonctionnelle des myofibrilles)**

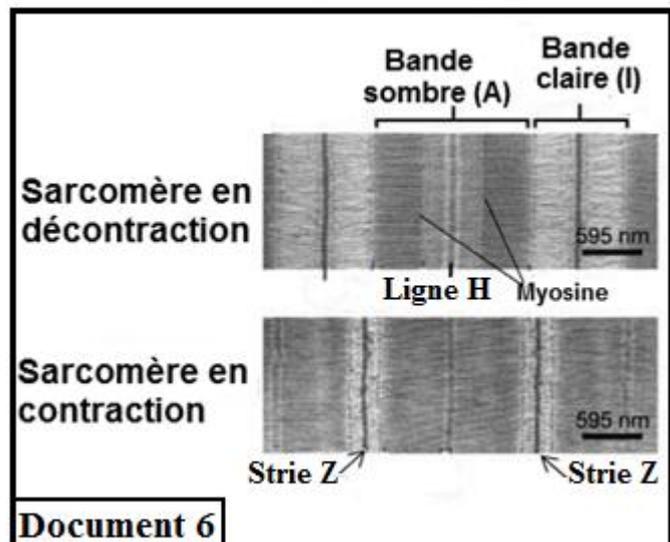


### III- Mécanismes de la contraction musculaire :

#### 1- Mise en évidence des modifications des fibres musculaires lors de la contraction :

- Activité 2 :** Le document 6 représente une image microscopique d'un sarcomère décontracté et en contraction.

- 1- Relevez les modifications que connaît le sarcomère lors de la contraction musculaire.
- 2- Que peut-on déduire concernant le mécanisme de contraction



Réponse :

1- Pendant la contraction musculaire :

Les sarcomères se raccourcissent (rapprochement des stries Z)

Les bandes sombres gardent une longueur constante,

Les bandes claires ainsi que les zones H diminuent de longueur,

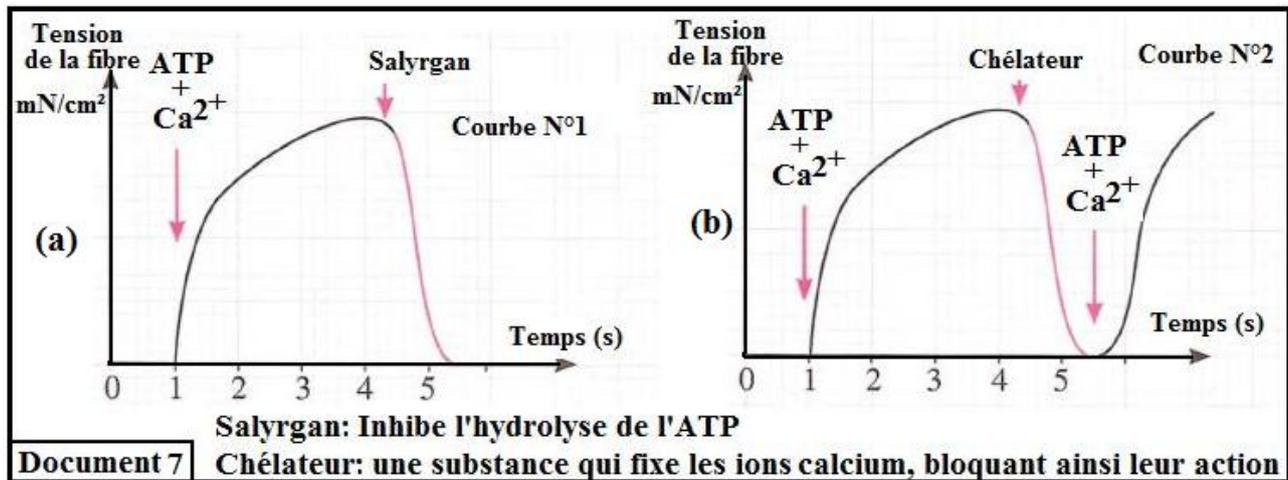
2- Il n'y a donc pas un raccourcissement des filaments d'actine et de myosine mais un glissement ou coulissage de l'actine par rapport à la myosine.

#### 2- Le mécanisme moléculaire de la contraction :

- Activité 3 :**

Des fibres musculaires isolées d'un muscle de Lapin sont montées entre lame et lamelle et observées au microscope optique. On peut alors mesurer leur état de contraction (tension) dans différentes conditions :

- **Expérience a** : étude de la contraction d'une fibre isolée en présence ou en absence de salyrgan, poison bloquant l'hydrolyse de l'ATP (Courbe 1).
- **Expérience b** : étude de la contraction d'une fibre isolée en présence ou en absence d'un chélateur du calcium (Courbe 2).



1- Décrivez la courbe 1, que déduisez-vous ? 2- Décrivez la courbe 2, que déduisez-vous ?

Réponse :

1- La courbe montre l'absence de tension avant l'introduction d'ATP et d'ions calcium dans le milieu. Cette tension augmente rapidement en présence d'ATP et  $\text{Ca}^{2+}$ , puis continue à augmenter jusqu'à l'injection de Salyrgan dans le milieu, après quoi, la tension de la fibre diminue jusqu'à ce qu'elle s'annule après 5 secondes.

→ Puisque le salyrgan inhibe l'hydrolyse de l'ATP, on déduit que l'énergie issue de l'hydrolyse de l'ATP est nécessaire pour la contraction des fibres musculaires.

2- La courbe 2 a une allure semblable à la première courbe, la tension augmente de la même manière jusqu'à l'introduction du chélateur qui fixe les ions calcium, après quoi la tension chute, et ne reprend qu'en présence à nouveau de  $\text{Ca}^{2+}$  et ATP.

→ La suppression de l'action du calcium par le chélateur arrête la contraction musculaire, on déduit que ces ions interviennent lors du phénomène de contraction.

☑ **Activité 4** : Le Tableau du document 8 résume les résultats d'expériences menées sur des extraits de cellules musculaires in-vitro.

Expériences	Conditions expérimentales	Résultats
1	Actine + Myosine + ATP	Formation de l'acto-myosine et contraction musculaire.
2	Actine + Myosine + $\text{Ca}^{2+}$ + ATP	
3	Actine + Myosine + ATP Troponine + Tropomyosine	Pas de formation d'acto-myosine ni de contraction
4	Actine + Myosine + Troponine + Tropomyosine + ATP + $\text{Ca}^{2+}$	Formation de l'acto-myosine et contraction musculaire.

Document 8

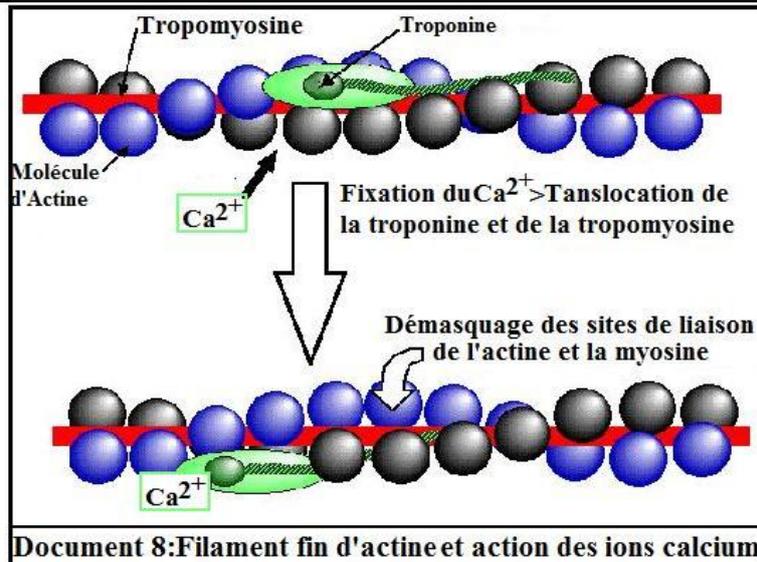
On précise que le complexe d'acto-myosine (liaison d'actine et de myosine) est un catalyseur de la réaction de l'hydrolyse d'ATP.

✎ **Déduisez d'après les résultats expérimentaux le rôle du  $\text{Ca}^{2+}$ .**

**Réponse :**

Les expériences 1 et 2 du document 8 montre que la formation d'acto-myosine et la contraction musculaire est possible avec ou sans  $\text{Ca}^{2+}$ , si le milieu ne contient pas de troponine ni de tropomyosine.

Par contre, cette contraction et la formation de l'acto-myosine n'est possible qu'en présence de  $\text{Ca}^{2+}$ , si la troponine et la tropomyosine se trouvent dans le milieu expérimental. On déduit que le rôle du  $\text{Ca}^{2+}$  est de permettre la liaison de l'actine et de la myosine malgré la présence de la troponine et de la tropomyosine.



**Le mécanisme de contraction musculaire :**

L'excitation du muscle produit la libération d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  jusque-là stockés dans le réticulum sarcoplasmique. Ces ions se répandent dans tout le sarcoplasme et permettent le démasquage des sites de liaison entre actine et myosine.

La fixation des têtes de myosines sur des molécules d'actine conduit à la formation des complexes d'acto-myosine (ponts transversaux).

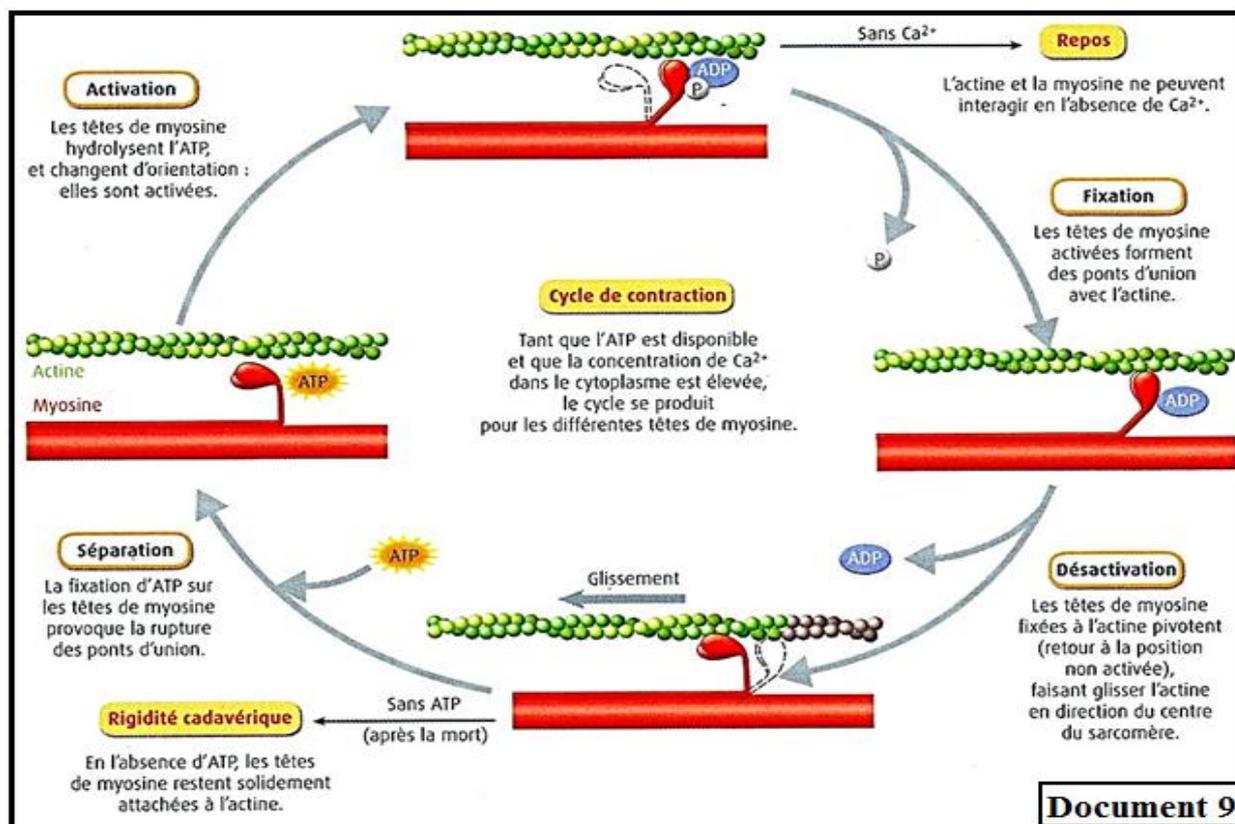
L'acto-myosine active l'hydrolyse de l'ATP liée préalablement aux têtes de myosines, ce qui libère une quantité d'énergie permettant le pivotement des têtes de myosine vers le centre du sarcomère (ligne H).

Ce pivotement est responsable du glissement des filaments d'actines par rapport aux filaments de myosines, ainsi le raccourcissement des sarcomères s'effectue, c'est la contraction.

La fixation rapide de nouvelles molécules d'ATP sur chaque tête de myosine provoque le détachement de myosine et de l'actine et le redressement rapide des têtes de myosine.

Après ce cycle de contraction, deux cas sont possible :

- Si l'excitation se poursuit, les mêmes étapes précédentes se répètent et la contraction continue.
- Si l'excitation s'arrête, la contraction s'achève et le muscle se relâche.



#### IV- Renouvellement (régénération) de l'ATP musculaire :

##### 1- Mise en évidence du renouvellement d'ATP :

- ☑ **Activité 5** : Pour mettre en évidence le phénomène de régénération de l'ATP musculaire, on propose le document 10 qui regroupe des mesures faites sur certains éléments chimiques dans un muscle avant et après une contraction :

Eléments	Avant contraction	Après contraction
Glycogène	1,08 g/kg	0,8 g/kg
Consommation d' $\text{O}_2$	Faible	Importante
ATP	4 à 6 mmoles/kg	4 à 6 mmoles/kg
Phospho-créatine	15 à 17 mmoles/kg	15 à 17 mmoles/kg
Acide lactique	1 mmoles/kg	1,30 mmoles/kg

Document 10

(?) : La phospho-créatine (CP) est un composé riche en énergie, se trouvant dans les fibres musculaires. Il peut réagir avec l'ADP suivant la réaction :  $\text{CP} + \text{ADP} \rightleftharpoons \text{ATP} + \text{C}$  (créatine).

Cette réaction libère aussi de la chaleur.

- 1- Comparez les données du tableau, déduisez la multiplicité des sources énergétiques du muscle.
- 2- Sachant que l'hydrolyse de l'ATP est la source directe de la contraction musculaire, expliquez l'évolution de la concentration d'ATP avant et après la contraction.

Réponse :

1- D'après le tableau de résultats on remarque la concentration constante de l'ATP et de la phospho-créatine avant et après la contraction musculaire. Cependant, les réserves de glycogène diminuent de 1,08 g/kg à 0,8 g/kg. Tandis que la consommation d'O<sub>2</sub> et la concentration d'acide lactique augmente.

On déduit que la fibre musculaire est capable de produire de l'énergie à partir de la respiration cellulaire et de la fermentation lactique. La disponibilité de phosphocréatine, molécule riche en énergie, nous fait supposer que son utilisation comme source d'énergie est possible.

2- L'ATP est nécessaire pour réaliser la contraction musculaire, donc on peut expliquer la constance de concentration d'ATP par son renouvellement permanent dans la fibre musculaire.

### ☑ **Activité 6 :**

Pour pouvoir effectuer des gestes rapides ou pour bouger pendant des heures, le muscle est muni de deux types de fibres : **Les fibres lentes** ou fibres rouges **dites de type I** et **Les fibres rapides** ou fibres blanches **dites de type II**. Le tableau suivant reprend certaines caractéristiques de ces fibres.

Fibre	Vitesse de contraction	Nombre de vaisseaux sanguins	Nombre de mitochondries	Enzyme réduisant le pyruvate	Fatigabilité
<b>Type I</b>	Lente	+++	+++	+	+
<b>Type II</b>	Rapide	+	+	+++	+++

Les (+) indique l'importance de chaque caractéristique

 **Identifiez, pour chaque type de fibre, la voie principale de régénération d'ATP.**

Réponse :

Les fibres de type I régénère l'ATP grâce à la respiration cellulaire, car on remarque la forte présence de vaisseaux sanguins qui acheminent les gaz respiratoires, et le nombre important de mitochondrie intervenant dans les réactions respiratoires.

Les fibres de type II utilise la fermentation car elles ne disposent pas de beaucoup de mitochondrie par contre l'activité enzymatique réductrice de pyruvate et importante, ce qui le transforme en acide lactique.

## 2- Les voies de régénération de l'énergie musculaire :

L'énergie mécanique de la contraction musculaire provient directement de l'énergie chimique (ATP). Pendant l'activité musculaire, la régénération de l'ATP se fait suivant des voies rapides anaérobies au début de l'activité puis par voie respiratoire aérobie lente.

### a. La voie anaérobie non lactique (alactique):

- Par interaction rapide de deux ADP :  $ADP + ADP \rightleftharpoons ATP + AMP$

Une réaction limitée par la présence d'une enzyme spécifique (Myokinase), où l'AMP est l'adénosine monophosphate.

- Réaction de la créatine phosphate :  $CP + ADP \rightleftharpoons ATP + C$  (Créatine)

Limitée par la concentration de phospho-créatine dans le muscle.

Ces réactions interviennent lors d'efforts intenses très courts, elles produisent une chaleur de contraction.

### b. La voie anaérobie lactique :

Par fermentation lactique au cours de laquelle la glycolyse régénère l'ATP avec un faible rendement. Cette voie produit une chaleur de relâchement, elle est effectuée par les fibres dites de type II (fibres rapides).

### c. La voie aérobie respiratoire :

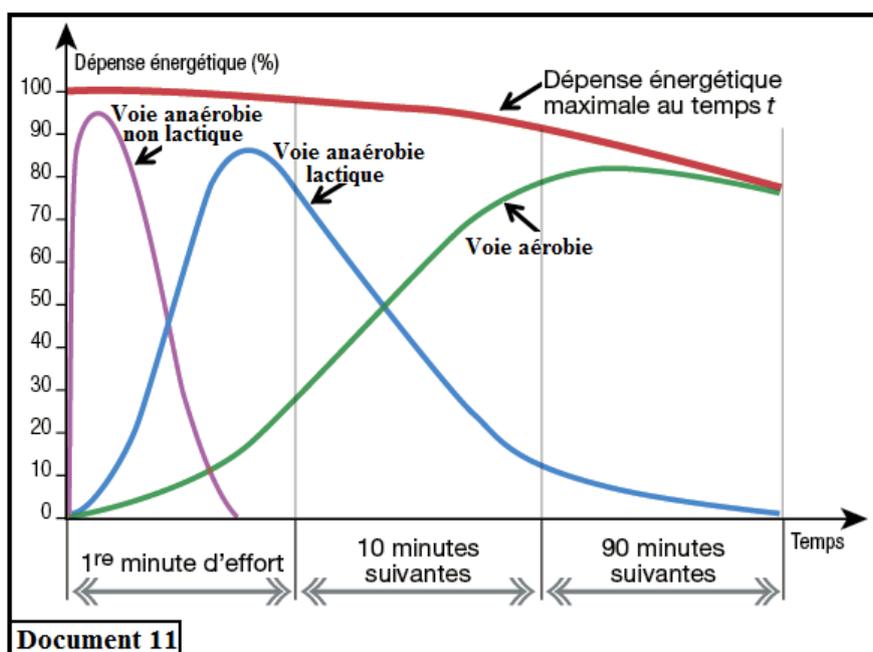
Par respiration cellulaire nécessitant l'apport continu d'O<sub>2</sub> et fait intervenir les fibres musculaires dites de type I (fibres lentes). Cette voie s'effectue lorsque l'effort musculaire se prolonge, et fournit un rendement énergétique important qui permet la poursuite de l'activité ainsi que la restauration

de l'ATP et de la phospho-créatine avec un dégagement de chaleur retardée.

### Remarques :

- Les réserves d'ATP et de créatine phosphate et le système glycogénolyse-acide lactique, peuvent entretenir une activité musculaire pendant environ une minute. Pour que l'effort soit maintenu dans la durée, il faut absolument utiliser la voie métabolique de la respiration cellulaire.
- L'acide lactique cumulé dans la fibre musculaire peut conduire à une inhibition enzymatique qui dérègle toute l'activité cellulaire. Cet acide est donc, dès la disponibilité d'ATP, transformé en glycogène dans des cellules spécifiques dans le foie et le cœur. Ceci explique la dette en O<sub>2</sub> qui participe aussi au rétablissement du taux de phospho-créatine.

(?) : La dette d'oxygène est définie comme l'oxygène excédentaire consommé durant la phase de récupération juste après exercice.

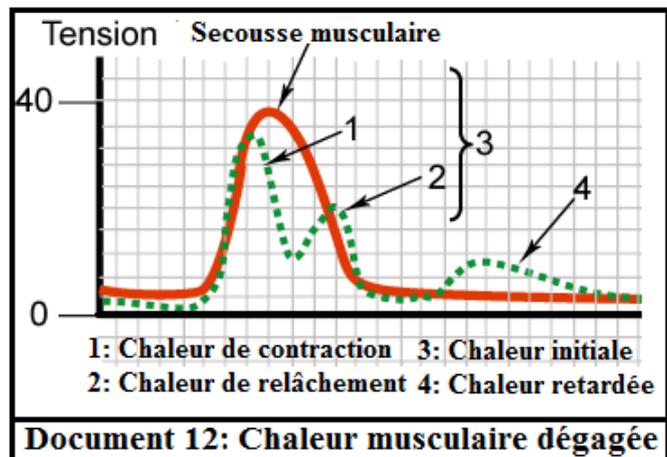


### 3- Les phénomènes accompagnant la contraction musculaire :

Tout muscle qui se contracte produit de la chaleur. Mais même au repos le muscle produit une petite quantité de chaleur (chaleur de repos). Cette production de chaleur augmente rapidement lors de la contraction, ce qui explique l'échauffement observé lors du travail musculaire.

On constate qu'au cours d'une secousse musculaire ou d'une contraction tétanique le dégagement de chaleur se fait en deux temps :

- ✓ Une **chaleur initiale**, libérée au cours de la contraction, d'amplitude importante, elle résulte de la régénération d'ATP par la phospho-créatine (Chaleur de contraction) et par la fermentation lactique (Chaleur de relâchement).
- ✓ Une **chaleur retardée**, libérée après la secousse musculaire dans un milieu aérobie, de faible amplitude, elle accompagne les réactions de renouvellement d'ATP par respiration cellulaire.



La contraction musculaire s'accompagne aussi par des phénomènes chimiques qui participent à la libération d'énergie dont la glycolyse (dégradation du glycogène), Oxydation des glucides, lipides et des acides gras.

#### ☑ Activité 7:

Le tableau du document 13 montre le pourcentage de chaque métabolisme énergétique impliqué dans la régénération de l'ATP lors de l'exercice de plusieurs types de sports. On peut classer ces sports selon leur intensité (forte ou faible) et leur durée (longue ou courte).

Sports	Durée	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100%	
Ski de fond	3 à 5 h	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 90% jaune (3)]											
Marathon	2 h à 3 h	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 90% jaune (3)]											
Marche	1 à 3 h	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 90% jaune (3)]											
Nage libre (1500m)	15 min	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 90% jaune (3)]											
Course (3000m)	8 min	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 90% jaune (3)]											
Course (1500m)	3 min 30 s	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 10% bleu (2), 80% jaune (3)]											
Nage libre (200m)	2 min	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 20% bleu (2), 70% jaune (3)]											
Course (400m)	49 s	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 20% bleu (2), 70% jaune (3)]											
Nage libre (100m)	10 s	[Barre à 100% : 10% rouge (1), 20% bleu (2), 70% jaune (3)]											
Haltérophilie	quelques secondes	[Barre à 100% : 100% rouge (1)]											

Document 13

1 Voie anaérobie (Phospho-créatine)  
 2 Métabolisme anaérobie (Fermentation lactique)  
 3 Métabolisme aérobie (Respiration cellulaire)

1- D'après les données du document 13, établissez la relation entre les voies métaboliques énergétiques et le type de sport exercé.