

2024

2eme Bac Sciences PC

Cours



PR. FATHI Sara

Introduction :

La respiration et la fermentation sont deux phénomènes de dégradation des substances organiques consommées, elles permettent de libérer l'énergie emmagasinée sous forme de molécules d'ATP, prêtes à être utilisées dans les différentes opérations consommatrices de l'énergie, comme les réactions chimiques et le mouvement. La contraction musculaire est l'un des phénomènes qui consomment de l'énergie.

- **Quelle est la source de l'énergie nécessaire pour l'activité musculaire ?**
- **Quelle sont les structures responsables sur les contractions musculaires ?**
- **Comment s'effectuent les contractions musculaires ?**
- **Comment utilisent les cellules musculaires le glucose comme source d'énergie ?**

I- Etude expérimentale des contractions musculaires :

1- Enregistrement de la contraction musculaire chez une grenouille :

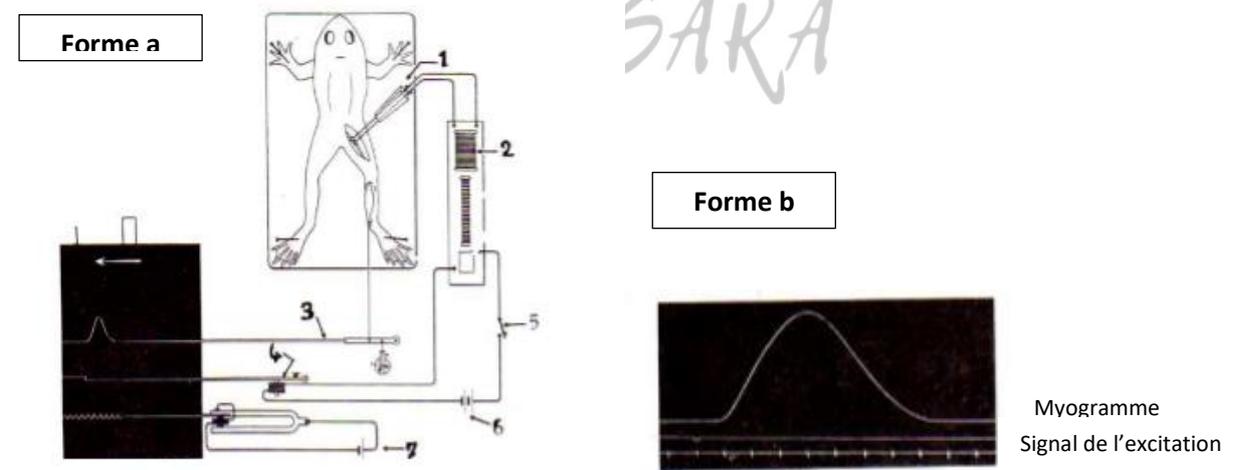
a- Protocole expérimental :

Figure 1 : Enregistrement de la contraction musculaire chez une grenouille.

Pour étudier la contraction musculaire, on peut utiliser le muscle gastrocnémien d'une grenouille démyélinisée et décérébrée : On dégage le muscle et le nerf sciatique, puis on sectionne le tendon inférieur du muscle et on le relie à un système d'enregistrement, le myographe qui amplifie les mouvements du muscle. Les enregistrements obtenus s'appellent myogrammes (Forme a).

On stimule le muscle soit directement ou par deux électrodes excitatrices à sa surface ou d'une façon indirecte en déposant les électrodes sur le nerf sciatique (Forme 2).

On stimule le muscle par des excitateurs artificiels qui peuvent être mécanique, thermique, chimique ou électrique.



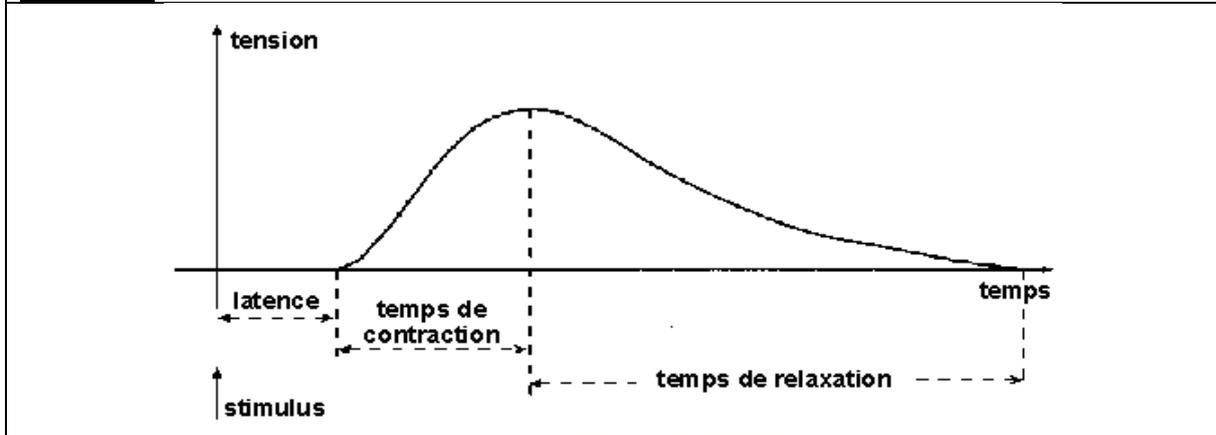
b- Réponse du muscle à l'excitation électrique

➤ Secousse musculaire isolée :

Lorsqu'on applique une stimulation efficace, le muscle répond à cette dernière, on dit que le muscle excitable en plus qu'il répond par la contraction, Quand on applique une excitation isolée, on obtient une contraction à court terme, isolée et simple qu'on appelle secousse musculaire.

La secousse musculaire peut être subdivisée en trois phases :

Figure 2 : Secousse musculaire isolée.



- **Le temps de latence** : c'est la durée qui sépare le moment de la stimulation et le début de la réponse.

- **La phase de contraction** : la phase ascendante au cours de laquelle la tension musculaire augmente progressivement.

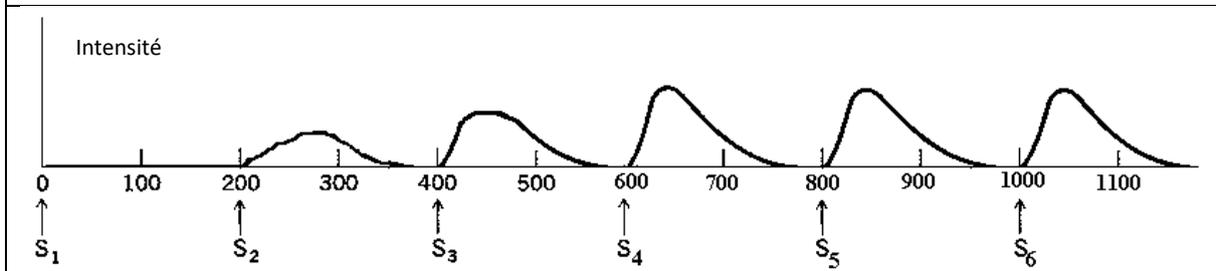
- **La phase de relâchement ou de relaxation** : la phase descendante au cours de laquelle la tension musculaire diminue progressivement pour retrouver sa valeur initiale.

Remarque :

- La forme du myogramme varie selon la vitesse du cylindre d'enregistrement.

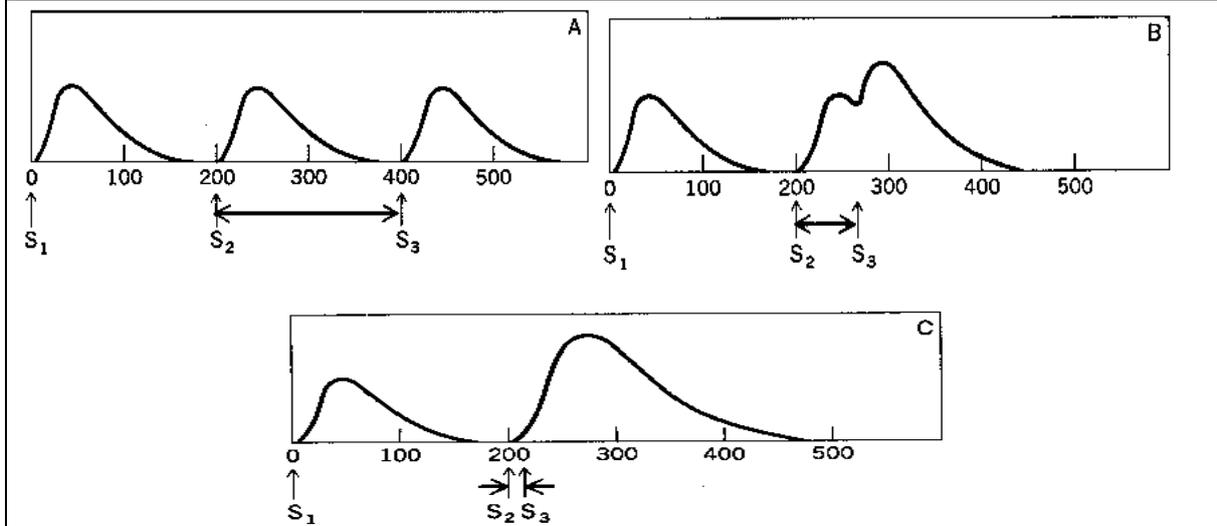
- Lorsque le muscle subit des stimulations éloignées, d'intensités croissantes, la réponse n'apparaît que lorsque l'intensité de la stimulation est supérieure ou égale une valeur précise appelée **seuil d'excitation** ou **rhéobase**.

Figure 3 : Variation de l'amplitude de la réponse du muscle en fonction de l'intensité de l'excitation.



➤ **Réponse du muscle à deux excitations successives :**

Figure 4 : Réponse du muscle à deux excitations successives.



Quand le muscle subit deux excitations successives, la réponse est différente selon le moment ou intervient la deuxième excitation mais aussi en fonction de l'intensité utilisée. On peut différencier entre trois cas :

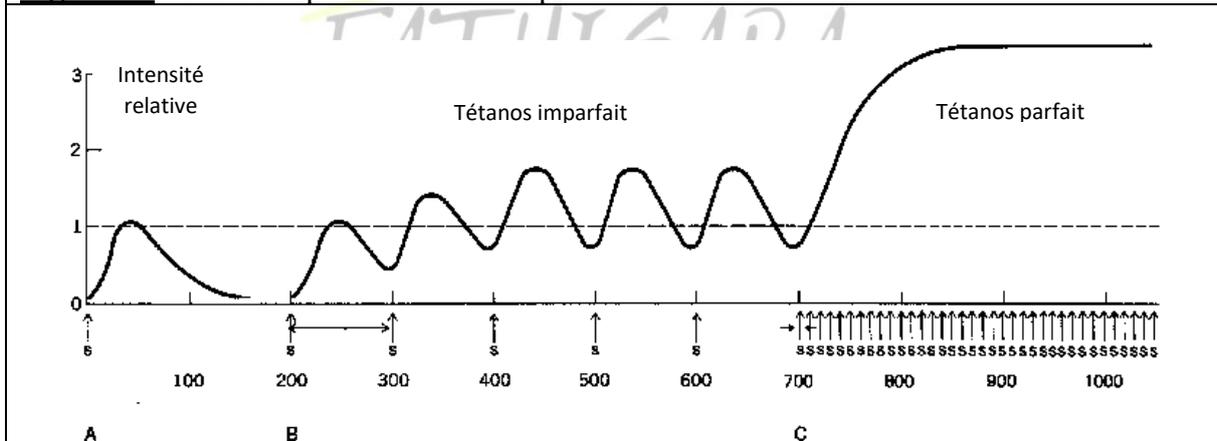
A : Si la deuxième excitation intervient après la fin de la première secousse, on obtient deux secousses identiques et indépendantes.

B : Si la deuxième excitation intervient au cours de la phase de décontraction de la première réponse, la deuxième réponse se superpose à la première sans qu'il y ait confusion des deux courbes.

C : Si la deuxième excitation intervient au cours de la phase de contraction de la première réponse, il y a une superposition et un prolongement des deux courbes. La tension totale créée est supérieur à celle de la secousse élémentaire.

➤ **Réponse musculaire à des excitations successives :**

Figure 5 : Tétanos imparfait et Tétanos parfait.



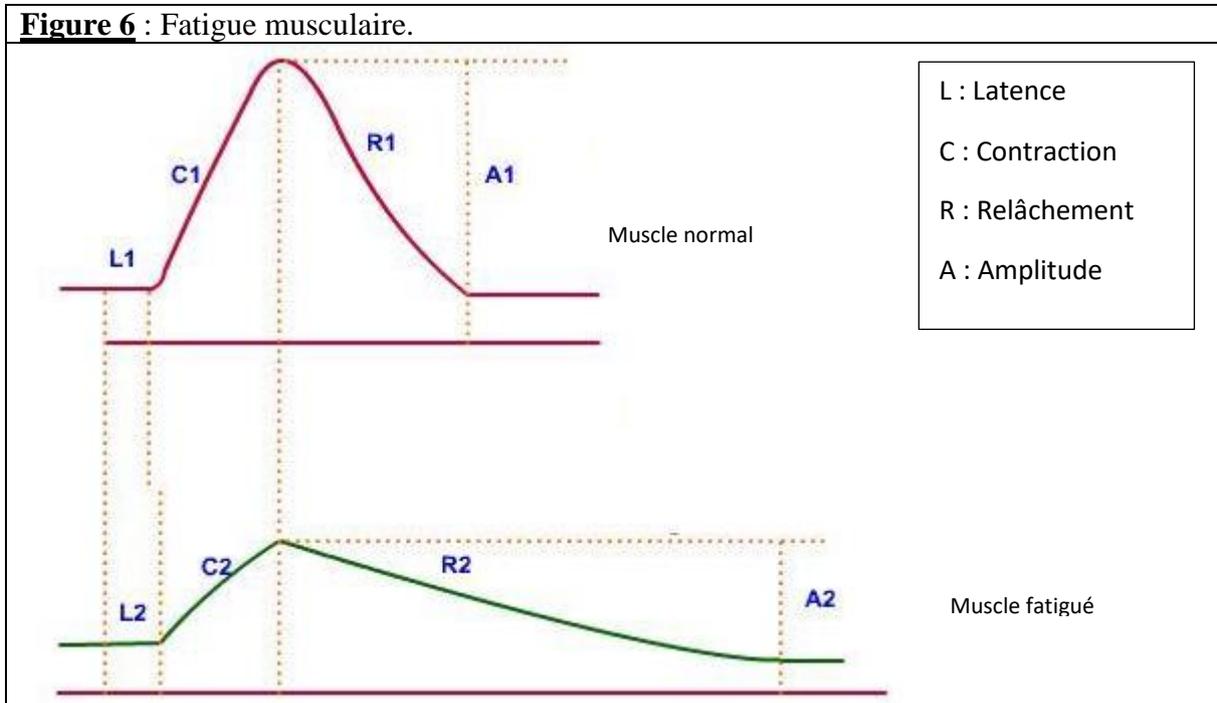
Lorsqu'on applique une série d'excitations successives, on observe deux cas :

- 1^{ier} cas (B) : Quand la fréquence des excitations est faible, on obtient un tracé constitué d'oscillations successives, ce type de contraction est appelé tétanos imparfait, qui peut être expliqué par une superposition incomplète des secousses musculaires, car chaque excitation a lieu au cours de la phase de relâchement de la première réponse.

- 2^{ème} cas (C) : Quand la fréquence des excitations est forte, on obtient un plateau à allure rectiligne. Ce type de contraction est appelé tétanos parfait, qui peut être expliqué par une superposition complète des secousses musculaires car chaque excitation a lieu au cours de la contraction de la réponse précédente.

Remarque :

Figure 6 : Fatigue musculaire.



Quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives il se fatigue. Ce phénomène se traduit par un allongement du temps de latence, une diminution de l'amplitude des contractions et une augmentation de la durée de contraction.

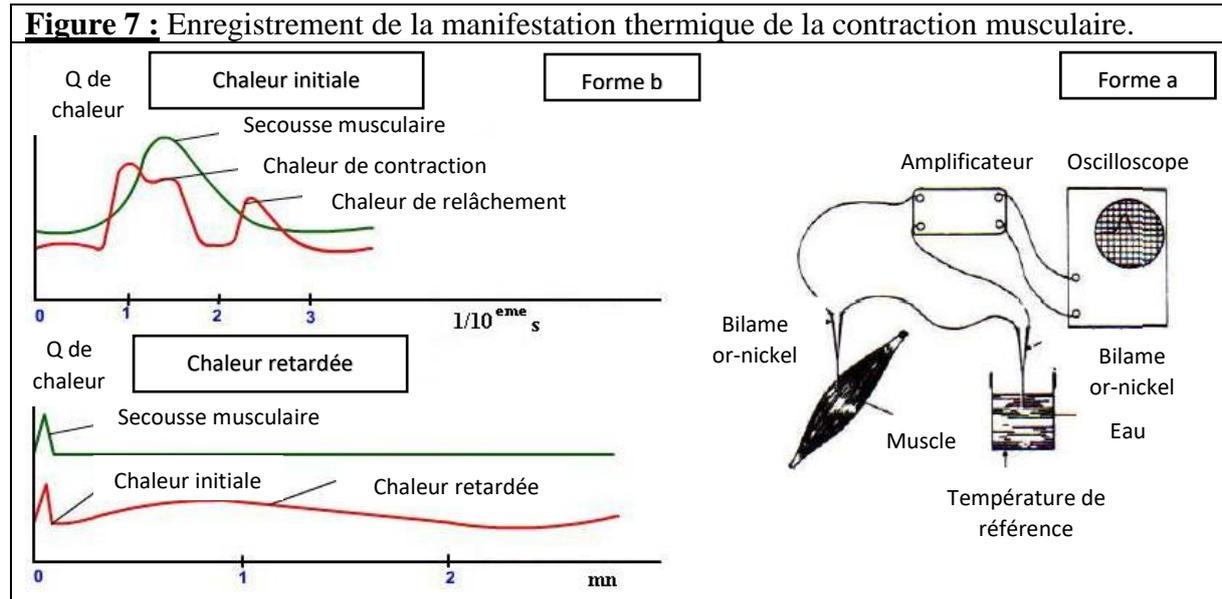
II- Les phénomènes accompagnant la contraction musculaire :

La contraction musculaire est un phénomène mécanique accompagné d'autres phénomènes thermique, énergétique et chimique.

1- Phénomènes thermiques accompagnant la contraction musculaire :

Lorsqu'on effectue un effort musculaire, le degré de la température interne du corps augmente, en parallèle avec l'augmentation du dégagement de la température. Ce dégagement varie selon l'intensité de l'effort.

a- Protocole expérimental :



Dans cette étude on utilise la thermopile constituée d'aiguilles thermoélectriques, chaque aiguille est composée de deux métaux différents (cuivre et nickel ou or et nickel).

La différence de la température entre les deux aiguilles génère une différence de potentiel électrique dont l'intensité est proportionnelle au degré de la température du muscle contracté.

b- Analyses et conclusion :

Pendant la contraction musculaire la chaleur se produit, sa production se répartie en deux phases principales :

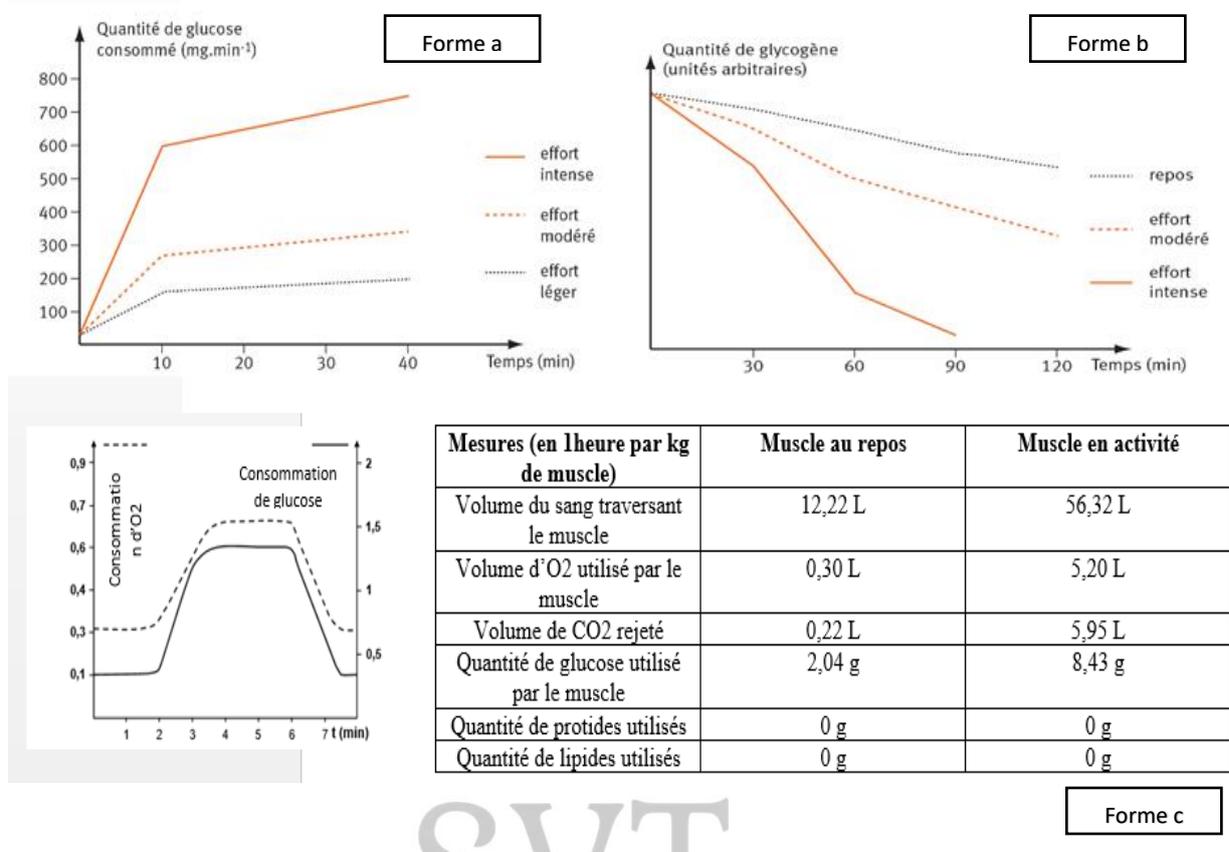
- **La chaleur initiale** : c'est la chaleur de départ qui se libère en deux parties : au cours de la contraction (chaleur de contraction), et pendant le relâchement (chaleur de relâchement), qui dure quelques dixièmes de la seconde.
- **La chaleur retardée** : libérée après la contraction musculaire et qui dure d'une à deux minutes.

2- Les phénomènes chimiques et énergétiques :

L'observation microscopique montre que le tissu musculaire est riche en vaisseaux sanguins, ceci peut être expliqué par le faite que l'activité musculaire augmente le besoin du muscle pour les nutriments et l'O₂ qui arrivent à ce dernier à travers le sang.

Figure 8 : Phénomènes métaboliques et énergétiques accompagnant la contraction musculaire.

Mesure de la quantité de glucose (Forme a) et de glycogène (Forme b) utilisés par les muscles des membres inférieurs en fonction de la puissance de l'effort physique ainsi que la variation de la consommation d'O₂ et des nutriments selon l'effort musculaire (Forme c).



Pendant l'effort musculaire, on observe une augmentation de la consommation du glucose en parallèle avec la diminution du stock musculaire en glycogène. On observe aussi une augmentation dans la consommation du dioxygène avec un dégagement du CO₂.

On déduit à partir de ces données que l'énergie nécessaire pour l'activité musculaire provient de la réaction de l'oxydation du glucose issu de l'hydrolyse du glycogène.

III- Structure et ultrastructure du tissu musculaire :

1- Structure du muscle squelettique strié :

a- Observation à l'œil nu :

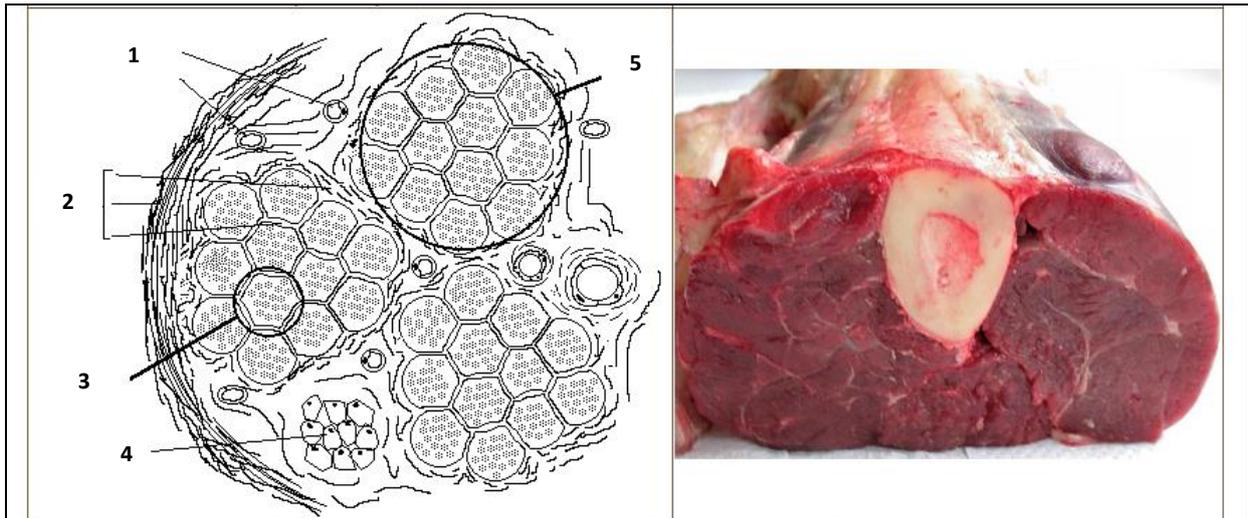
Figure 9 : Structure du muscle squelettique strié.

- **Forme a :** Coupe transversale des muscles dans une jambe de bœuf.

- **Forme b :** Croquis explicatif.

Forme b

Forme a



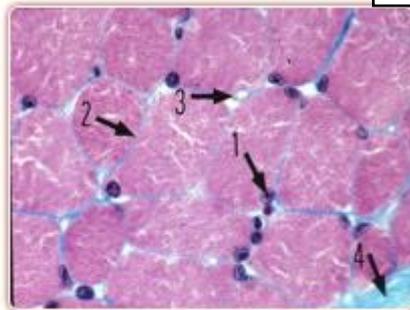
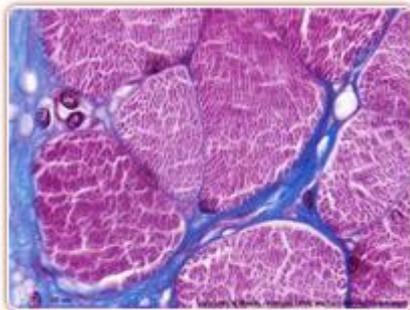
1 : Vaisseaux sanguins, 2 : Tissus conjonctifs ; 3 : Fibre musculaire ; 4 : Tissu adipeux ; 5 : Faisceaux de fibres musculaires.

Le muscle squelettique est composé d'un ventre de couleur rouge dû à la présence de myoglobine et de tendons assurant les attaches sur les os. Dans le ventre, les faisceaux de fibres musculaires sont emballés dans les tissus conjonctifs.

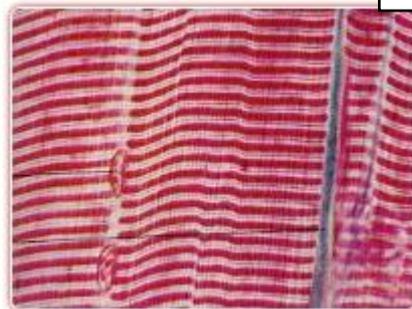
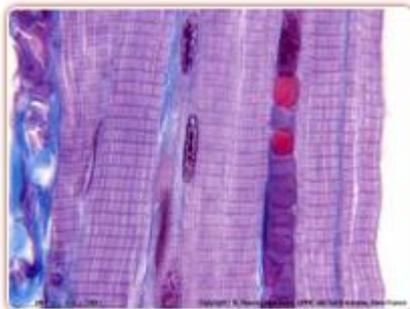
b- Observation microscopique :

Figure 10 : Observation microscopique d'une fibre musculaire.

- **Forme a :** Coupe transversale des muscles squelettiques striés.
- **Forme b :** Coupe longitudinale des muscles squelettiques striés.



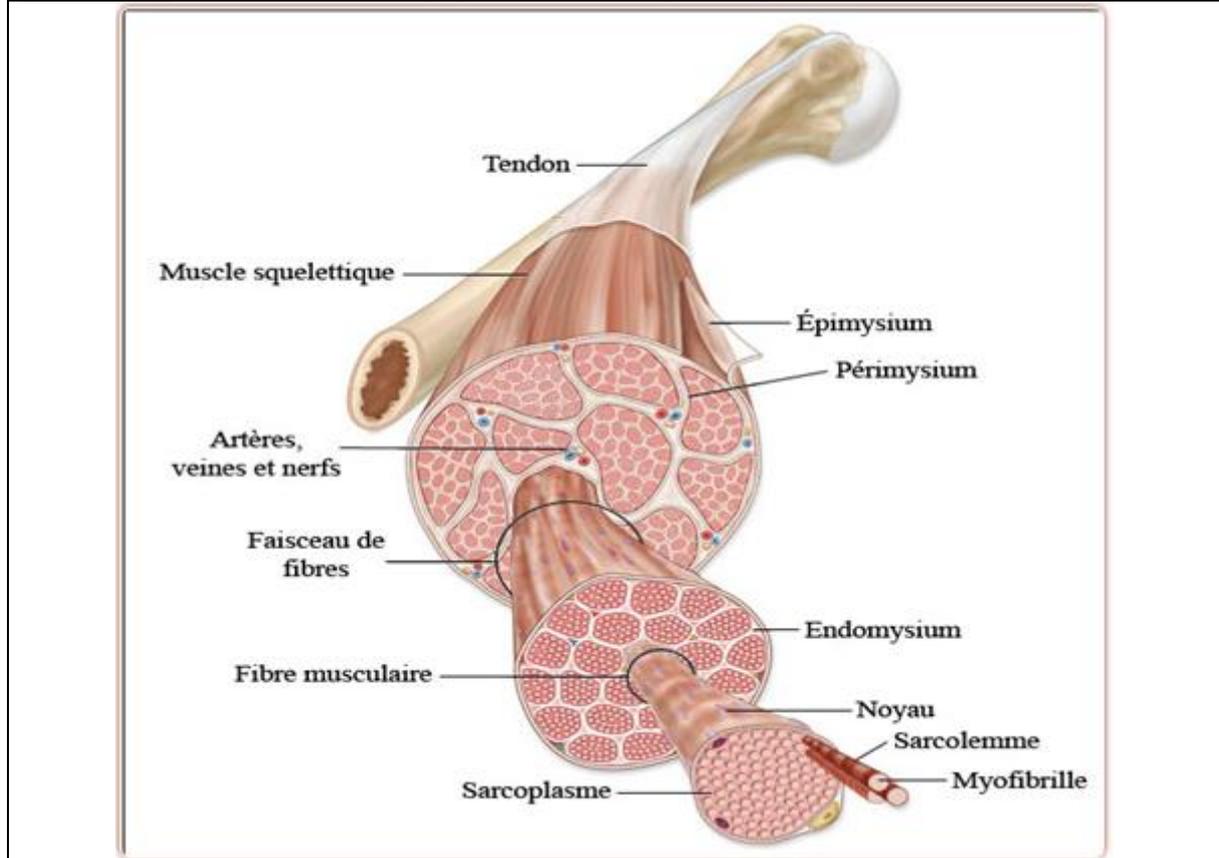
Forme a



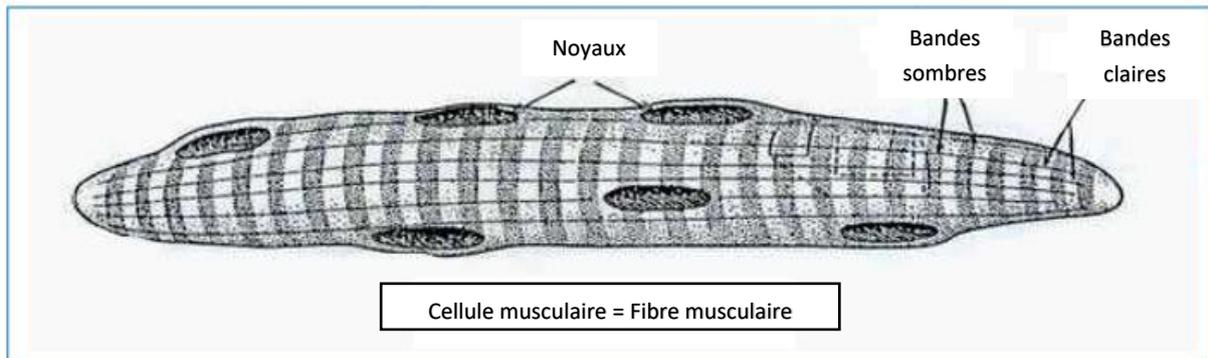
Forme b

- Les coupes transversales des muscles squelettiques striés montrent des fibres musculaires de diamètres différents. Les noyaux périphériques en (1) Les fibres musculaires sont séparées d'un tissu conjonctif (2 et 4) qui contient des capillaires sanguins (3).
- Les coupes longitudinales des muscles squelettiques montrent des fibres musculaires parallèles et striées contenant plusieurs noyaux périphériques.

Figure 11 : Structure microscopique du muscle squelettique strié.



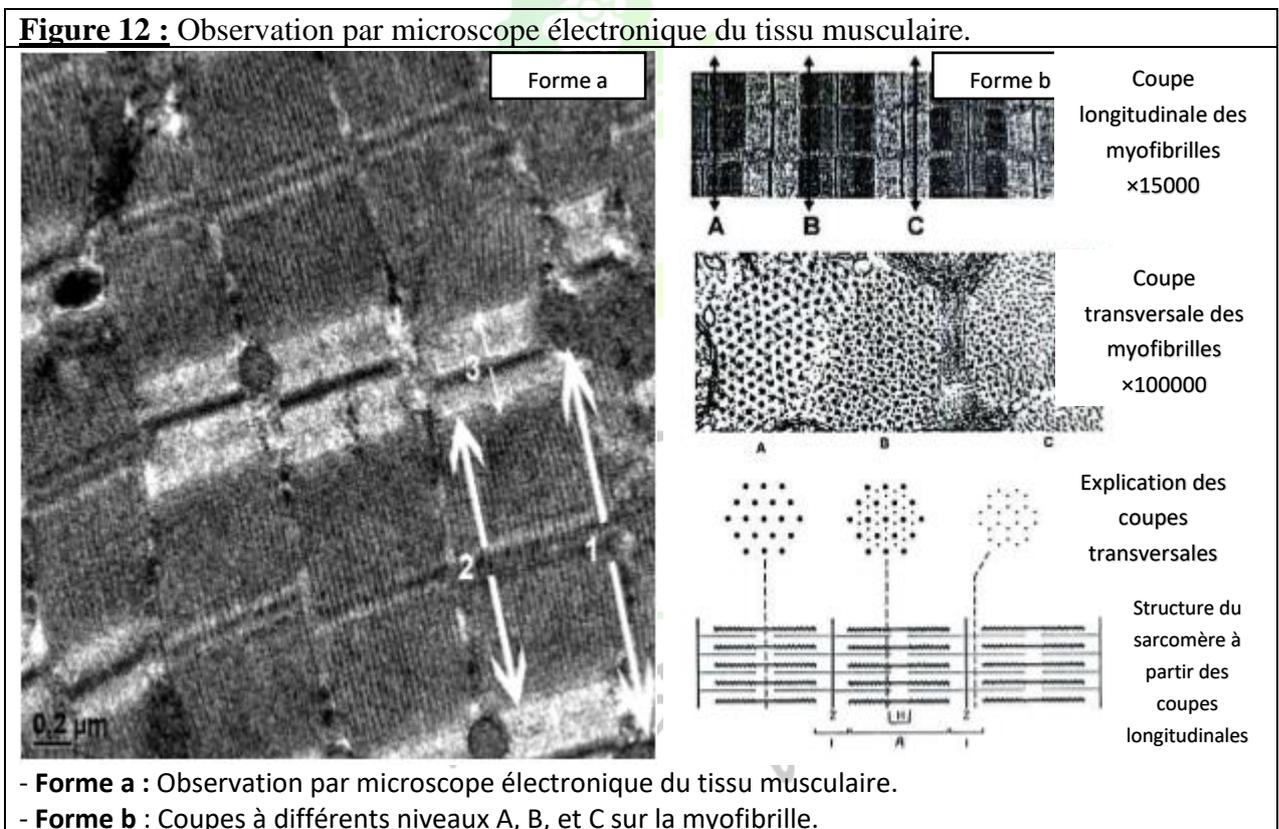
La coupe longitudinale montre que le muscle comprend des milliers de cellules très allongées appelées fibres. La fibre ou cellule musculaire présente une striation transversale très caractéristique qui est à l'origine de nom « muscles strié squelettique » que l'on donne aux muscles rattachés aux os et responsables des mouvements. Une fibre est une cellule géante (1 à 5 cm de long, 10 à 100 μ m de diamètre), à plusieurs noyaux périphériques (cellule plurinucléée= syncytium), et dont le cytoplasme (=sarcoplasme) contient de très nombreuses myofibrilles s'étendant sur toute la longueur de la fibre. La coupe transversale de la fibre montre de nombreuses myofibrilles internes qui sont les éléments responsables sur la contraction.



2- Ultrastructure de la fibre musculaire :

a- Observation par microscope électronique :

Figure 12 : Observation par microscope électronique du tissu musculaire.



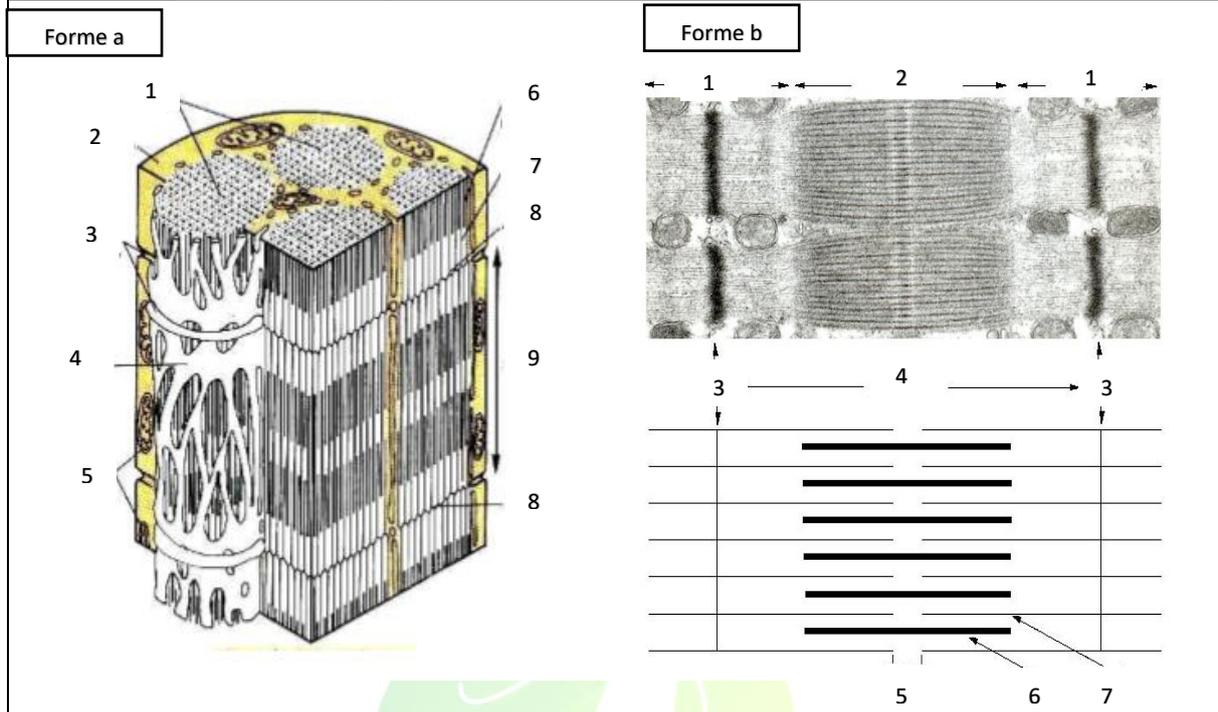
- **Forme a** : Observation par microscope électronique du tissu musculaire.

- **Forme b** : Coupes à différents niveaux A, B, et C sur la myofibrille.

Cette observation montre que les myofibrilles sont constituées d'une alternance entre deux types de bandes :

- Bandes claires (Isotropique = I) constituées de filaments fins d'une protéine appelée actine, médiés par la strie Z.
- Bandes sombres (Anisotropique = A) constituées de filaments d'actine et d'autres filaments épais d'une protéine appelée myosine médiés par une zone H contenant uniquement les filaments de myosines.

Figure 13 : Structure des myofibrilles.



- Les éléments correspondant aux numéros à la forme a de la figure :

1 : Deux myofibrilles ; 2 : sarcoplasme ; 3 : Tubules transversales ; 4 : Réticulum sarcoplasmique ; 5 : Mitochondries ; 6 : Filaments de myosine (épais) ; 7 : Filaments d'actine (fins) ; 8 : Strie Z ; 9 : Sarcomère.

- Les éléments correspondant aux numéros de la forme b :

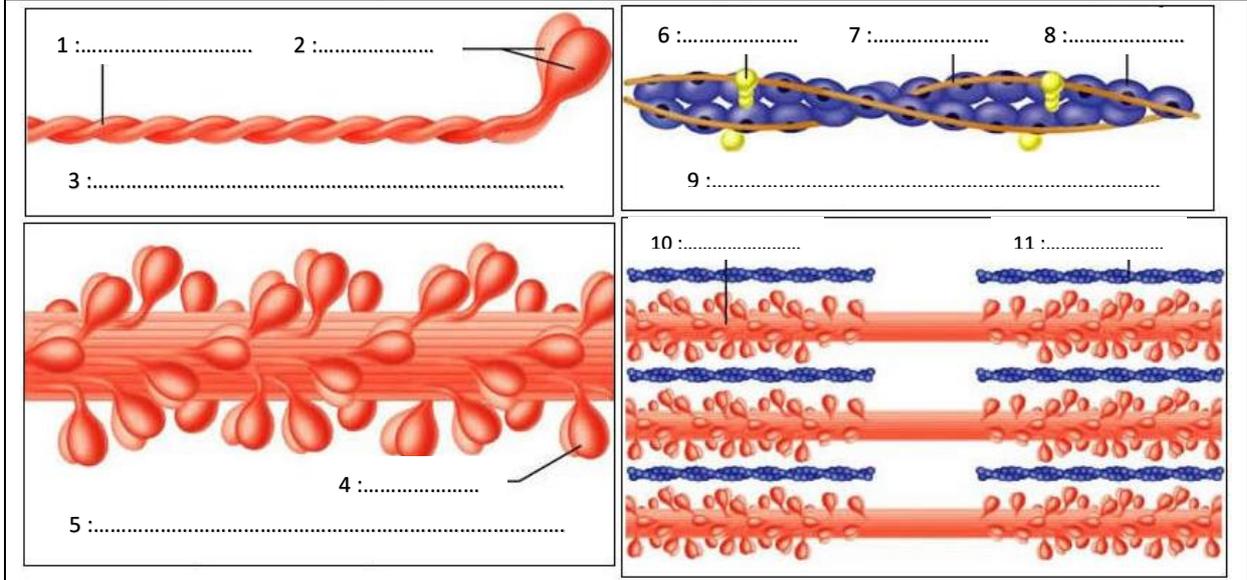
1 : Bande claire ; 2 : Bande sombre ; 3 : Strie Z ; 4 : Sarcomère ; 5 : Zone H ; 6 : Filament de myosine ; 7 : Filament d'actine.

Chaque myofibrille est constituée des unités successives appelées sarcomères, qui se situent entre deux stries Z. Le sarcomère est considéré comme l'unité structurelle de la fibre musculaire.

Le sarcomère contient un grand nombre de mitochondries et une quantité considérable de glycogène ainsi qu'un réticulum endoplasmique abondant renfermant une bonne quantité de calcium.

b- Structure moléculaire des myofilaments :

Figure 14 : Schéma de l'organisation des myofilaments d'actine et de myosine.



- Les noms correspondants à chaque élément de la figure :

1 : Tige ; 2 : Tête bilobée ; 3 : Molécule de myosine ; 4 : Tête de myosine ; 5 : Filament de myosine ; 6 : Complexe de troponine ; 7 : Tropomyosine ; 8 : Actine ; 9 : Filament d'actine ; 10 : Filament épais ; 11 : Filament fin.

- Chaque filament fin ou filament d'actine est constitué d'une protéine dominante appelée l'actine, en plus de deux protéines moins abondants qui sont la troponine et la tropomyosine.

- Chaque filament épais ou filament de myosine est constitué d'un faisceau de molécules de protéine de myosine, chaque molécule comporte une tête bilobée et une tige.

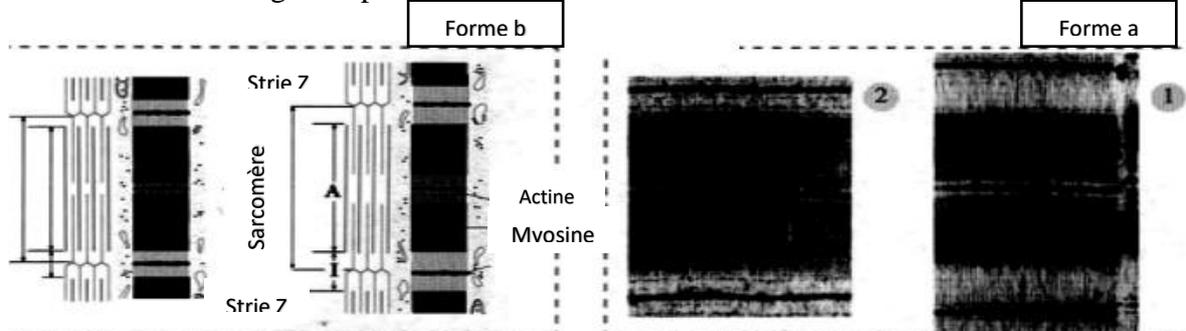
IV- Mécanisme de la contraction musculaire :

1- Que se passe-t-il pendant la contraction musculaire ?

Figure 15 : Les variations observées pendant la contraction musculaire.

Un muscle en état de repos et un autre contracté ont été congelés, par la suite ils ont effectué des coupes au niveau de ces deux muscles pour les visualiser sous microscope électronique.

La forme a de cette figure représente le résultat obtenu.



Précisez les variations observées sur la fibre contractée puis expliquez ces variations.

On remarque que la contraction du muscle est accompagnée par :

- Un raccourcissement des sarcomères.

- Une réduction de la longueur des bandes claires I ainsi que la zone H.
- La longueur de la bande sombre reste constante.

Puisque la longueur des bandes sombres reste constante, on peut déduire que le raccourcissement observé au niveau du sarcomère ne résulte pas du raccourcissement des myofilaments mais du glissement des myofilaments d'actine par rapport aux myofilaments de myosines dans le sens du centre de sarcomère ce qui provoque le rapprochement de la strie Z et la réduction de la zone H. C'est le mécanisme du glissement des filaments.

2- Mécanisme du glissement des filaments :

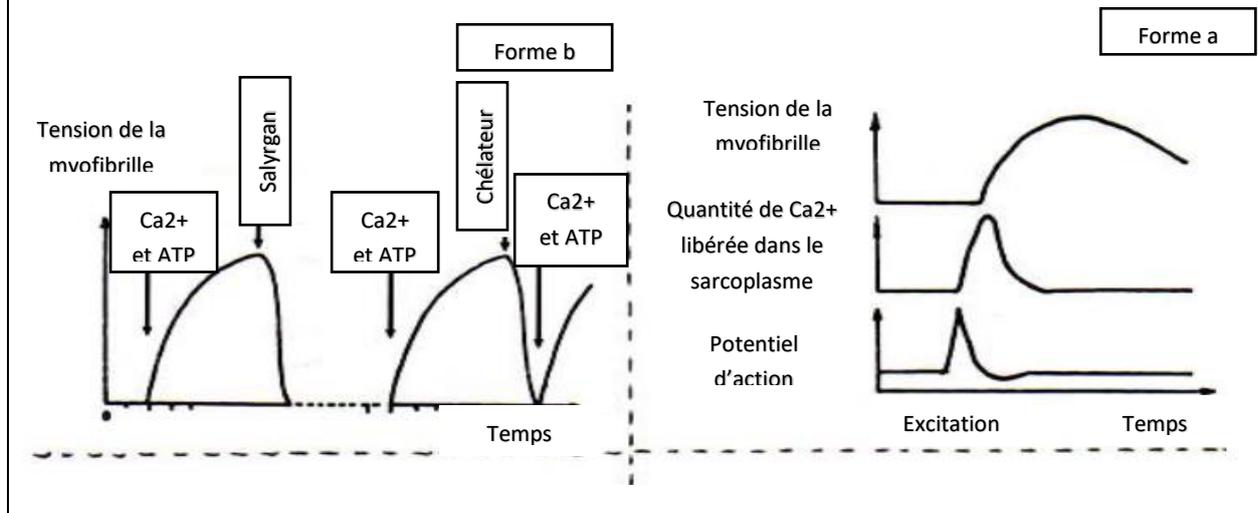
Figure 16 : Evolution de la tension des myofibrilles en fonction des différents facteurs.

Des études ont montré l'existence d'une affinité entre les têtes de myosine et l'actine. En présence des ions de calcium Ca^{2+} , les têtes de myosine se lient à l'actine donnant un complexe d'acto-myosine qui forme des structures spécifiques appelées les ponts transversaux. En se basant sur ces données ainsi que les données des formes a et b de la figure, déterminez la relation entre les ions de calcium et la formation des ponts transversaux.

- **Forme a :** Les résultats de mesure de la quantité de Ca^{2+} dans le sarcoplasme de la cellule musculaire et son intensité après son excitation.
- **Forme b :** Résultats de l'influence de la présence ou l'absence de l'ATP et le Ca^{2+} sur la tension de la myofibrille.

Chélateur : substance chimique qui se lie au calcium et inhibe son activité.

Salyrgan : une substance qui inhibe l'hydrolyse d'ATP.



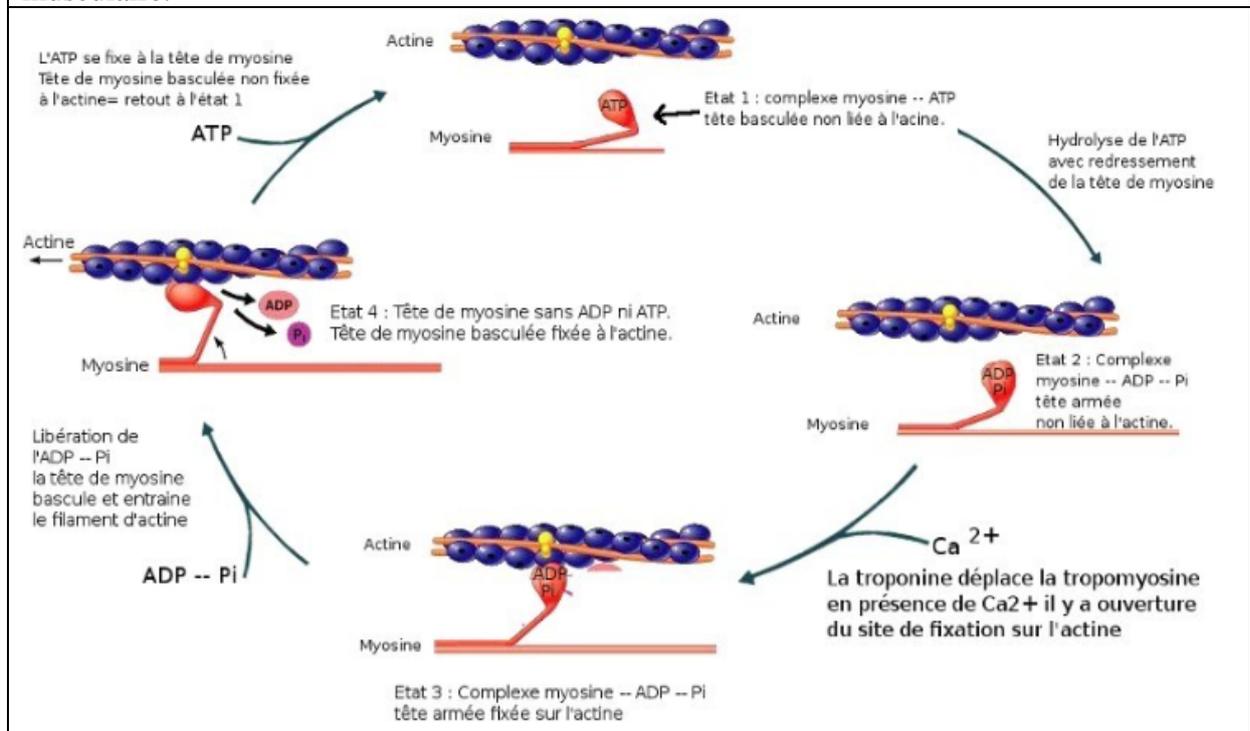
- Forme a : Après l'excitation directe du muscle, on observe une augmentation de la concentration du calcium dans le sarcoplasme, suivi d'une augmentation de tension de la myofibrille.

- Forme b : On remarque que la contraction des myofibrilles est rapide en présence d'ATP et des ions Ca^{2+} , et lorsqu'on inhibe l'hydrolyse d'ATP par le salyrgan, la tension de la myofibrille disparaît. Alors que lorsqu'on inhibe l'activité de Ca^{2+} , la tension de la myofibrille disparaît malgré la présence d'ATP.

On déduit de ces données que la tension de la myofibrille nécessite la présence d'ATP et de Ca^{2+} , Ce dernier libère les zones de liaisons entre l'actine et la myosine favorisant ainsi la formation des ponts transversaux.

3- Conclusion :

Figure 17 : La réaction entre les filaments d'actine et de myosine pendant la contraction musculaire.



La contraction musculaire nécessite la présence d'ATP et des ions de Ca^{2+} , et s'effectue comme suit :

- Au repos, la troponine masque le site de liaison de la myosine avec l'actine. Une molécule d'ATP est liée à la tête de myosine.
- L'arrivée de l'influx nerveux provoque une augmentation de la concentration intrasarcoplasmique d'ions de calcium qui se fixent à la troponine. Cette fixation induit un changement de conformation de la troponine qui permet le démasquage du site de fixation de l'actine à la myosine.
- La liaison actine-myosine déclenche l'activité ATPasique de la myosine permettant l'hydrolyse de l'ATP en ADP+ Pi. L'énergie fournie permet le basculement de la tête de myosine qui provoque un déplacement des myofilaments fins le long des myofilaments épais, et donc la contraction musculaire.
- La libération d'ADP et la fixation d'une nouvelle molécule d'ATP permettent le redressement de la tête de myosine et la suppression de la liaison entre l'actine et la myosine.
- L'ion Ca^{2+} est réabsorbé activement grâce à l'ATP, la myosine se détache de l'actine. Les sites d'attachement actine-myosine sont de nouveau masqués.
- Le sarcomère revient passivement à sa longueur initiale.

V- Les voies de régénération de l'ATP dans la cellule musculaire :**1- Données expérimentales :**

Figure 18 : La variation de quelques constituants chimiques du muscle avant et après la contraction.

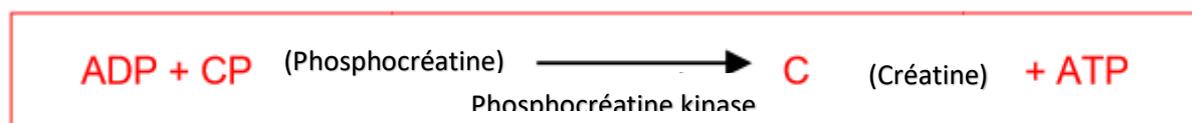
Expériences	Observations	Substances calibrées	Résultats du calibrage	
			Avant la contraction	Après la contraction
Excitation électrique du muscle	Contraction du muscle pendant 3 min.	- Glycogène - Acide lactique - ATP - Phosphocréatine	1,62 1,5 2 1,5	1,21 1,95 2 1,5
Excitation du muscle en présence d'une substance qui bloque la glycolyse	Contraction du muscle dans les mêmes conditions expérimentales précédentes.	- Glycogène - Acide lactique - ATP - Phosphocréatine	1,62 1,5 2 1,5	1,62 1,5 2 0,4
Excitation du muscle en présence d'une substance qui bloque la glycolyse ainsi qu'une substance inhibant la phosphocréatine kinase (enzyme nécessaire pour la dégradation de la phosphocréatine)	Le muscle se contracte normalement puis s'arrête.	- Glycogène - Acide lactique - ATP - Phosphocréatine	1,62 1,5 2 1,5	1,62 1,5 0 1,5

Cette figure présente la variation de quelques substances chimiques avant et après la contraction musculaire. Comparez les valeurs du tableau puis expliquez la variation des valeurs d'ATP avant et après la contraction.

- On observe, pendant la 1^{ère} expérience, que le pourcentage du glycogène diminue et celui du lactate augmente alors que les pourcentages d'ATP et de la phosphocréatine restent constants.

La stabilité du pourcentage d'ATP dans cette expérience malgré sa consommation au cours de la contraction musculaire montre que son renouvellement se fait d'une façon continue. Ce renouvellement est le résultat de la fermentation lactique au cours de laquelle l'hydrolyse du glycogène produit le glucose qui subit une fermentation pour donner le lactate + l'ATP.

- Pendant la 2^{ème} expérience on remarque que seule le pourcentage de la phosphocréatine diminue, ce résultat montre que le renouvellement d'ATP dans ce cas s'effectue grâce à la phosphocréatine qui est une substance riche en phosphate, permettent le renouvellement d'ATP selon la réaction suivante :



- Au cours de la 3^{ème} expérience le muscle a arrêté sa contraction après l'épuisement de son stock en ATP, ce qui signifie que l'ATP ne s'est pas renouvelé.

2- Méthodes de renouvellement d'ATP :

On peut classer les voies de renouvellement d'ATP en trois types selon la vitesse de leur intervention.

a- Les voies anaérobies rapides :

En moins de 30 secondes démarre deux réactions de renouvellement d'ATP :

- Par la réaction entre ADP sous l'effet d'un enzyme spécifique (le myokinase) :



- Par la phosphocréatine : $\text{ADP} + \text{CP} \longrightarrow \text{ATP} + \text{C}$

Cette réaction est accompagnée par une libération de chaleur c'est la chaleur initiale.

b- Les voies anaérobies d'une vitesse moyenne :

Représentées par la fermentation lactique, au cours de laquelle l'hydrolyse du glycogène donne le glucose qui subit une glycolyse au niveau de l'hyaloplasme pour donner deux acides pyruviques qui se transforment en lactates selon les réactions suivantes :



c- Les voies aérobies lentes :

Au cours de la respiration cellulaire, le glycogène musculaire subit une hydrolyse pour donner le glucose, ce dernier est totalement dégradé en des substances minérales (CO₂ et H₂O) en présence d'O₂, avec la libération d'une grande quantité d'énergie chimique sous forme d'ATP en plus d'une énergie thermique, c'est la chaleur retardée.