Pr. El yamani Abdelkader	Unité 1 : Consommation de la matière organique et flux d'énergie
	Chapitre 2 : rôle du muscle strié squelettique dans la conversion de l'énergie

Mise en situation

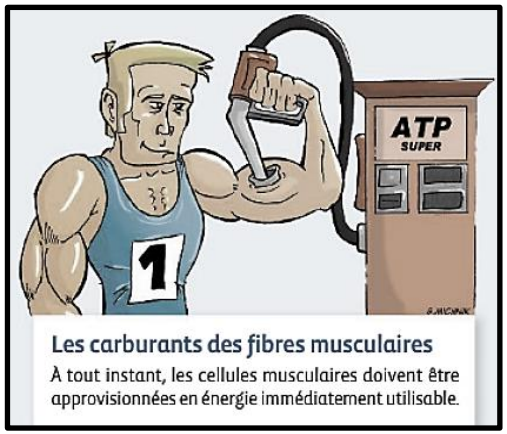
Au cours des réactions de la respiration cellulaire et la fermentation, la cellule transforme l'énergie emmagasinée dans les nutriments en énergie chimique utilisable, c'est l'ATP.

Pour exécuter les nombreuses tâches essentielles à la vie (production des molécules = biosynthèse ; transporter des substances à travers leurs membranes ; se déplacer ou se reproduire), les cellules doivent consommer de l'énergie (ATP).

Parmi les organes spécialisé dans la conversion de l'énergie chimique emmagasiné dans l'ATP en énergie mécanique, le musque squelettique strié en est y un exemple.

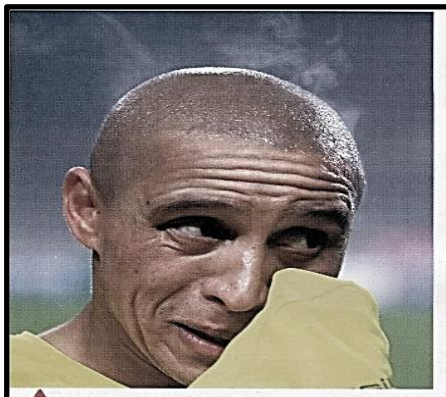
Un effort impossible à maintenir

Certaines pratiques sportives (haltérophilie, sprint) sont des exercices dont la puissance est d'emblée très importante : un tel effort ne peut être maintenu que pendant une durée très courte.

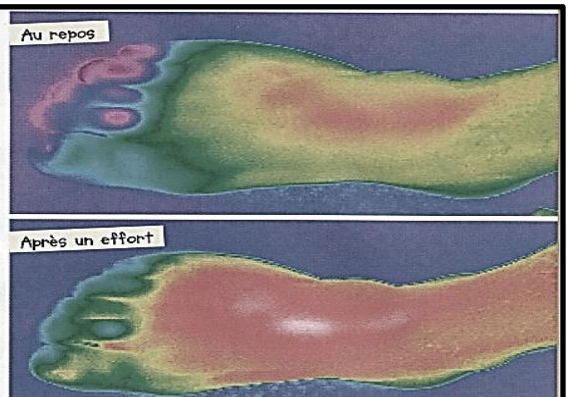


Les carburants des fibres musculaires

À tout instant, les cellules musculaires doivent être approvisionnées en énergie immédiatement utilisable.



2 Un sportif après l'effort. Le dégagement de chaleur est une manifestation de la dépense d'énergie par l'organisme.



3 Observation d'un pied par thermographie. La couleur rouge indique un fort dégagement de chaleur.

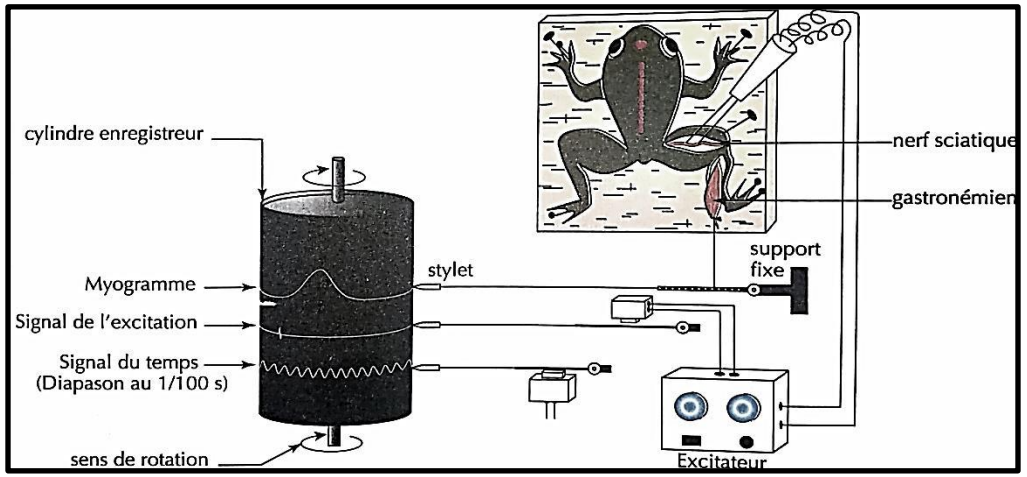
Activité 1 : L'étude expérimentale de l'activité mécanique du muscle squelettique

Les muscles sont des organes contractiles spécialisés dans la création des forces permettant le mouvement et le déplacement du corps ainsi que le maintien de sa posture.

Quelles sont les manifestations mécaniques de la contraction musculaire ?

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

Cette étude se fait à l'aide d'un appareil appelé myographe. L'expérience est particulièrement facile à réaliser sur une grenouille privée de mouvements volontaires par destruction de l'encéphale et de mouvements réflexes par destruction de la moelle épinière. Le tendon qui relie le gastrocnémien au pied est sectionné et relié par un fil au stylet inscripteur dont la pointe peut se déplacer sur un cylindre entouré d'un papier enduit de fumée noire. Le cylindre peut tourner autour de son axe. On met le cylindre en marche, puis le muscle est excité par l'intermédiaire du nerf sciatique. La courbe obtenue appelée myogramme résulte des mouvements simultanés du cylindre et du stylet inscripteur animé par le muscle.

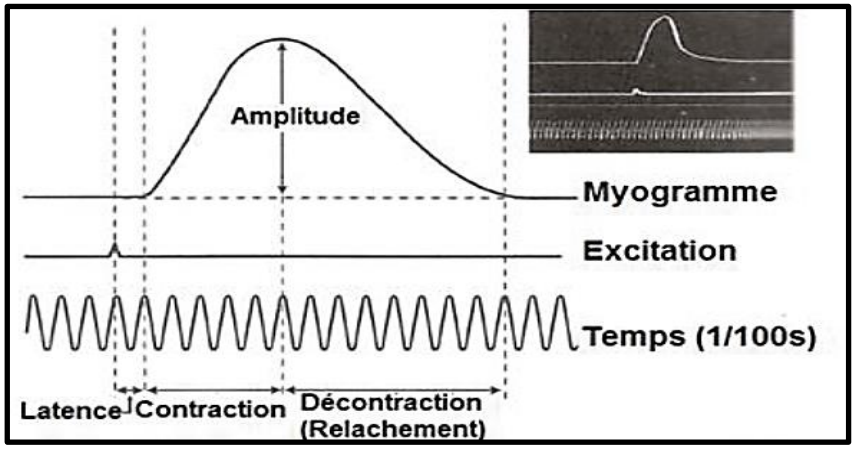


L'excitant habituellement utilisé est le courant électrique. Son intensité et sa fréquence sont réglables. D'autres excitants sont de nature variée : chimique (l'acide) ; thermique (chaleur) ; ou mécanique (choc physique, pincement).

Activité 1 : L'étude expérimentale de l'activité mécanique du muscle squelettique

Doc 2 : les phases d'une secousse musculaire isolée

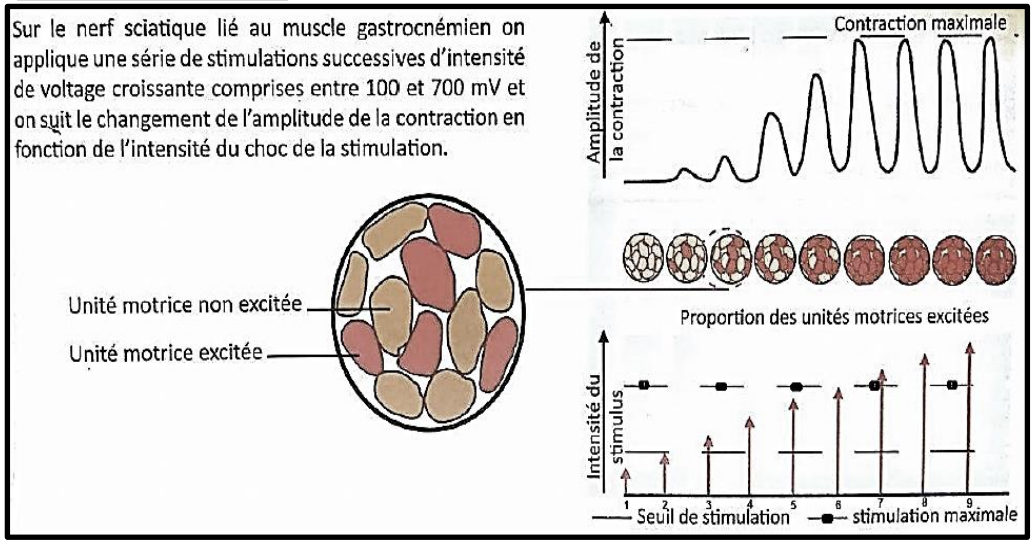
On stimule le muscle par une excitation électrique unique et efficace, le myogramme suivant représente l'enregistrement obtenu :



1- **Analyser** l'enregistrement obtenu

2- **Déterminer** les différentes phases d'une secousse musculaire

Doc 3 : Réponse musculaire à une série de stimulation efficace successives et d'intensité croissante



1- **Analyser** l'enregistrement obtenu

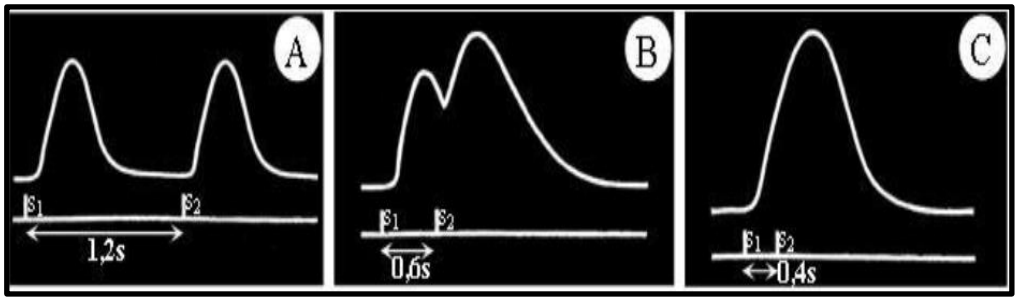
2- **expliquer** pourquoi le muscle n'a pas répondu à la stimulation 1

3- sachant que le muscle est constitué de plusieurs fibres musculaire, **établir** la relation entre l'intensité des stimulations et l'amplitude des contractions.

Activité 1 : L'étude expérimentale de l'activité mécanique du muscle squelettique

Doc 4 : Réponse du muscle à deux excitations successives

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



1- **Analyser** les enregistrements obtenus (mettre en relation la durée qui sépare chaque deux stimulations et le myogramme obtenu)

2- **Interpréter** les myogrammes obtenus.

Doc 5 : Réponse du muscle à des excitations successives

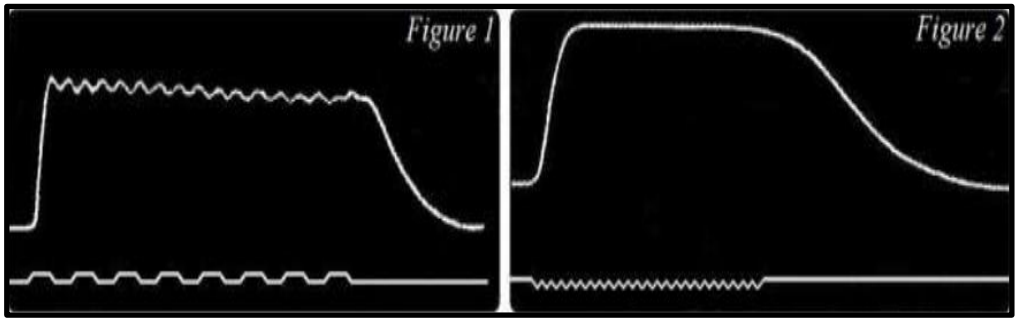
On applique sur un muscle une série de stimulations d'intensité constante mais dont on fait varier la fréquence :

Figure 1 : fréquence de 10 Hz (10 chocs/s)

Figure 2 : fréquence de 50 Hz (50 chocs/s)

Excitation survenant pendant la phase de relâchement de la secousse relative à l'excitation précédente : tétanos imparfait

Excitation survenant pendant la phase de contraction de la secousse relative à l'excitation précédente : tétanos parfait



1- **Analyser** les enregistrements obtenus

2- **Expliquer** le tétanos parfait et le tétanos imparfait

Activité 2 : Phénomènes thermiques et énergétiques liés à l'activité musculaire

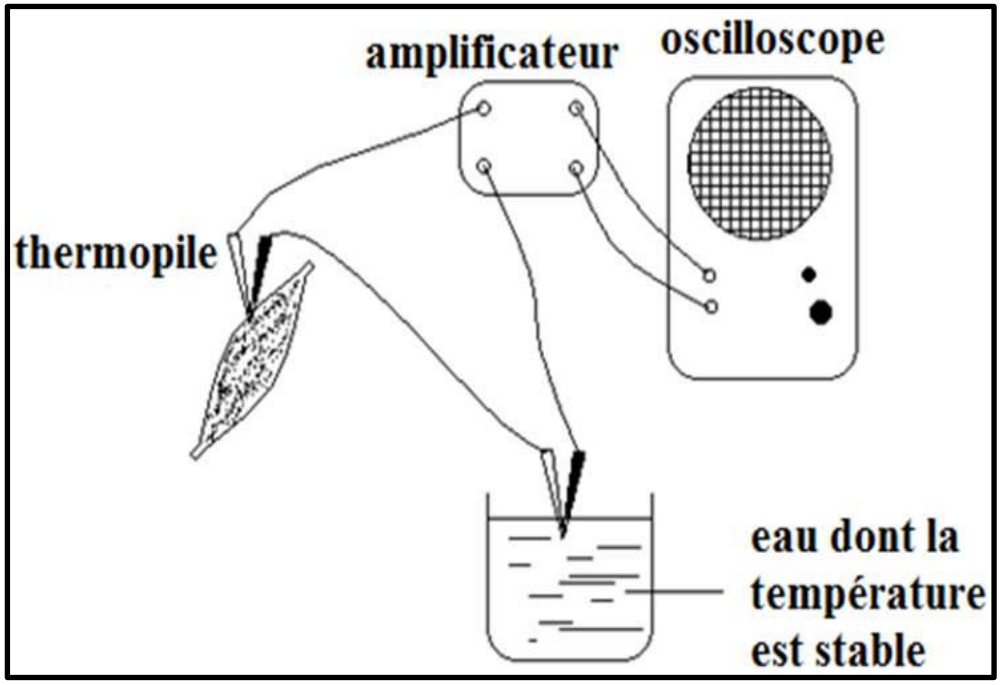
Toute activité mécanique est accompagnée d'un dégagement de la chaleur et d'un réchauffement de l'organisme.

Quelles sont les manifestations thermiques accompagnant la contraction musculaire ?

Doc 1 : la thermopile : la mesure de l'activité thermique du muscle

Pour mesurer la quantité de chaleur produite lors d'une contraction musculaire, ont utilisé la thermopile. C'est un instrument qui comporte deux aiguilles thermo-électriques, formée chacune de deux métaux différents (cuivre ou or et nickel).

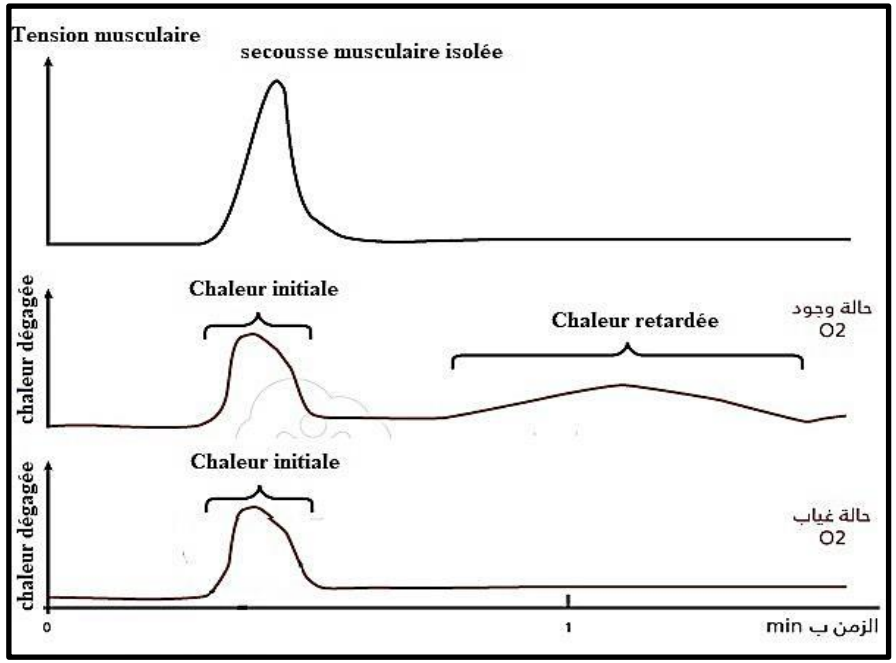
L'une des aiguilles est introduite dans le muscle, l'autre est maintenue à une température de référence. Lorsque le muscle se contracte, une différence de température apparait entre les deux aiguilles et engendre un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à la température du muscle. Ce courant est traduit sous forme de courbes qui apparaissent sur l'écran d'un oscillographe.



Activité 2 : Phénomènes thermiques et énergétiques liés à l'activité musculaire

Doc 2 : Enregistrement des manifestations thermiques de la contraction musculaire

Des mesures de dégagement de chaleur par le muscle isolé ont été réalisées en milieu riche en oxygène (milieu aérobie) et en milieu dépourvu de l'oxygène (milieu anaérobie) ; on permit d'obtenir les résultats suivant :



1- **Analyser** les résultats obtenus : décrire la quantité de la chaleur dégagée suivant les conditions expérimentales

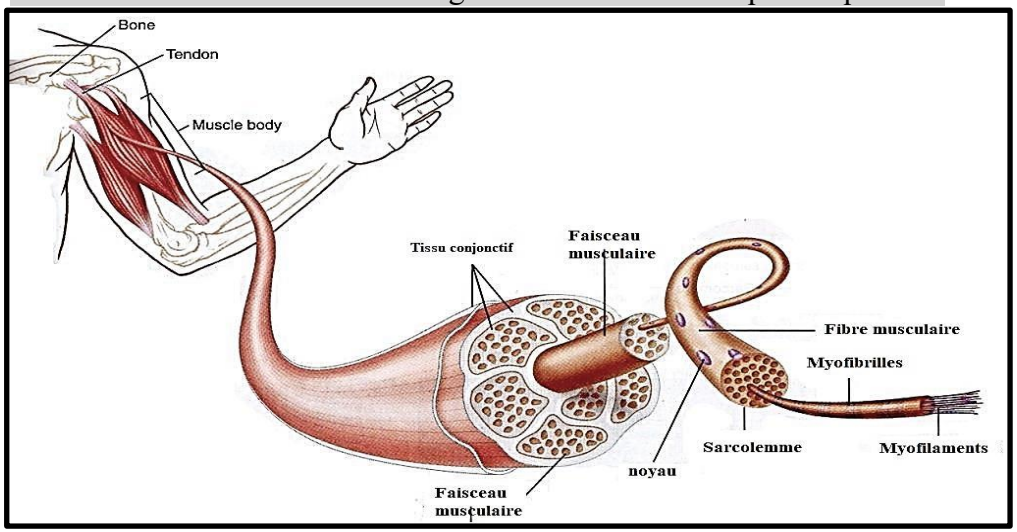
2- **déterminer** les réactions métaboliques responsables du dégagement du chaque type de chaleur

Activité 3 : La structure et l'ultrastructure du muscle

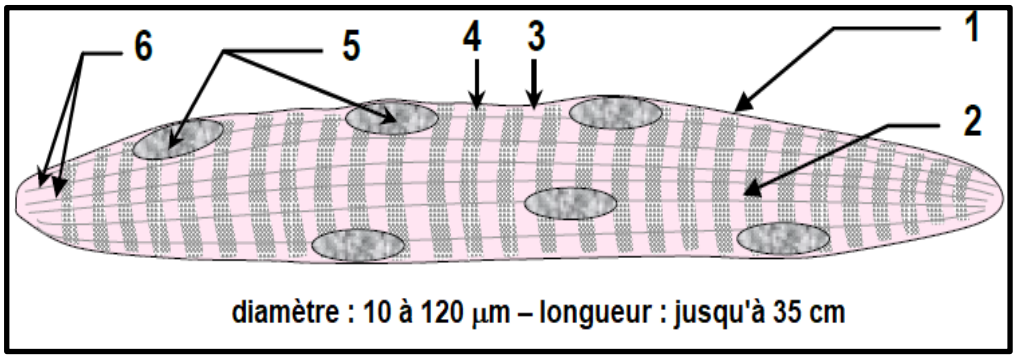
Afin de comprendre comment la contraction du muscle squelettique produit du mouvement par conversion de l'énergie, il est au préalable nécessaire de connaitre l'organisation particulière de ces cellules très spécialisées.

Quelles sont les structures musculaires qui interviennent dans la contraction musculaire ?

Doc 1 : les différents niveaux d'organisation du muscle squelettique strié



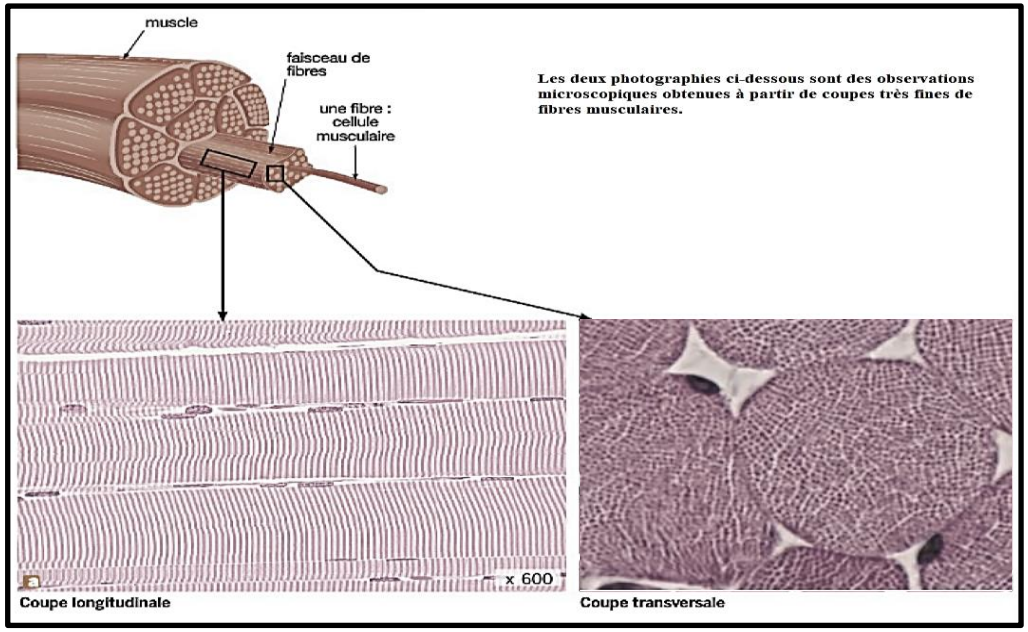
Doc 2 : schéma d'une cellule musculaire (fibre musculaire)



1- **décrire** la structure du muscle squelettique strié (doc1)
2- **décrire** les constituants de la fibre musculaire (doc2)

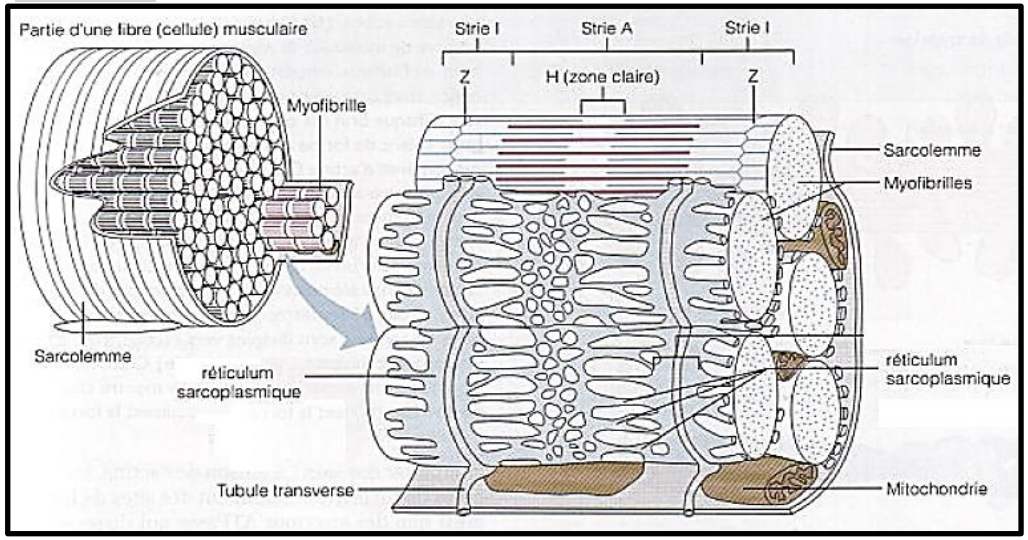
Activité 3 : La structure et l'ultrastructure du muscle

Doc 3 : vue en coupe de la fibre musculaire



1- **décrire** la structure microscopique d'une fibre musculaire
2- **justifier** pourquoi dit-on que le muscle squelettique est strié

Doc 4 : reconstitution tridimensionnelle de l'organisation de la fibre musculaire



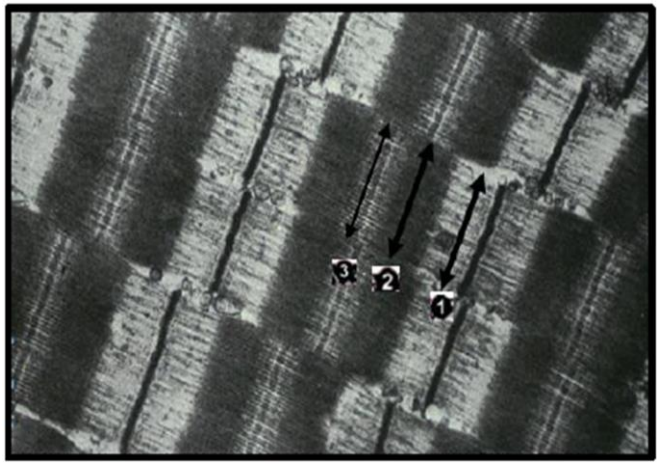
1- **Extraire** les informations supplémentaires fournies par le document

Activité 3 : La structure et l'ultrastructure du muscle

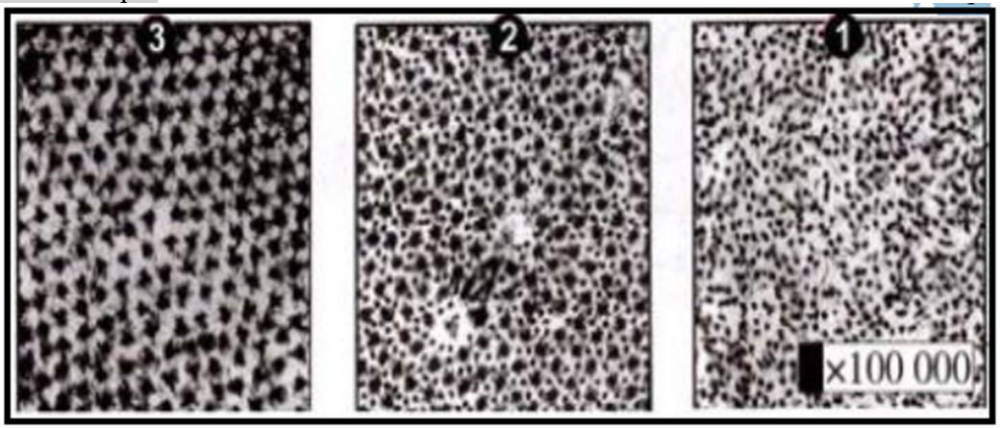
Doc 5 : observation microscopique des myofibrilles

Chaque myofibrille est formée d'une succession de sarcomère

1- **prouver** ceci par l'image ci-contre



Doc 6 : observation de coupes transversales de myofibrille au microscope électronique

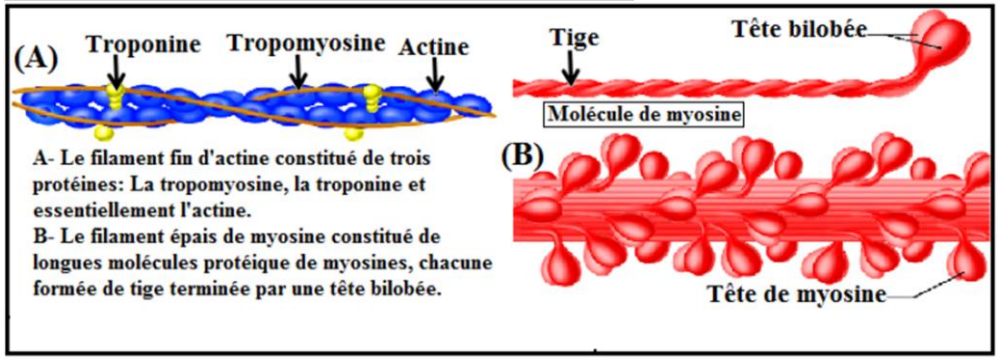


1- **décrire** les coupes transversales

2- **réaliser** un schéma interprétatif du sarcomère

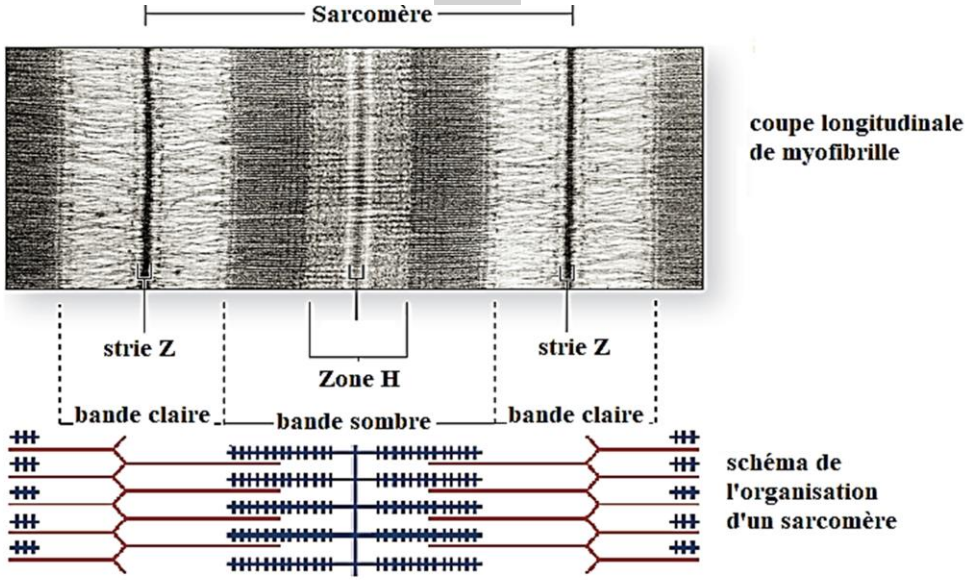
Activité 3 : La structure et l'ultrastructure du muscle

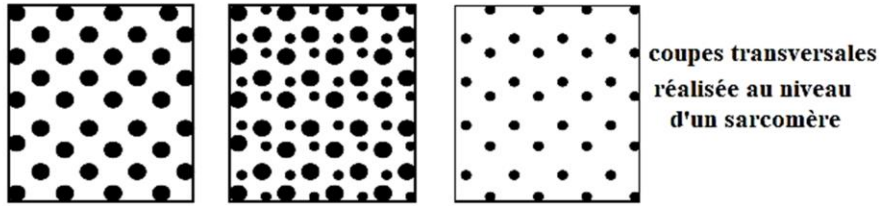
Doc 7 : organisation moléculaire des sarcomères



1- **Décrire** la composition moléculaire des myofilaments (filament d'actine et filament de myosine)

Bilan :





Activité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire

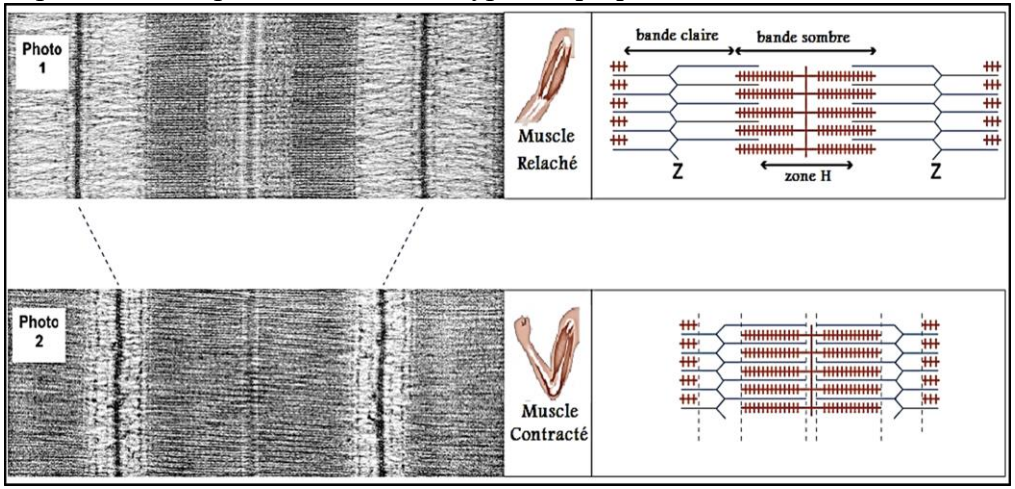
Un mouvement, par exemple une flexion du bras, est dû au raccourcissement qui résulte de la contraction d'un muscle. Les interactions entre les myofilaments sont responsables de ce raccourcissement et nécessitent l'intervention de l'ATP

Quel est le mécanisme de la contraction musculaire ?

Comment se fait la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique dans une cellule musculaire ?

Doc 1 : observation au microscope électronique de la contraction des myofibrilles.

Des fibres musculaires au repos et des fibres musculaires en état de contraction ont été congelées brutalement. L'observation en microscopie électronique de la structure fine des myofibrilles montre des différences importantes d'aspect entre les deux types de préparations.



1- **légender** la figure 2, puis répondre aux affirmations suivantes par vraie ou fausse

pendant la contraction musculaire, le sarcomère se raccourcit, avec le raccourcissement de la longueur des myofilaments d'actine et de myosine	
Pendant la contraction musculaire, les bandes claire et sombre se raccourcissent, et les stries Z se rapprochent	
Pendant la contraction musculaire, la bande claire et la zone H se raccourcissent, et les stries Z se rapprochent	
pendant la contraction musculaire, la longueur des myofilaments demeure constante. et les myofilaments de myosine glissent vers le centre du sarcomère	
pendant la contraction musculaire, les myofibrilles se raccourcissent, entrainant le raccourcissement des fibres musculaires. résultat le muscle se contracte	
pendant le relâchement musculaire, la longueur des myofilaments s'accroît	

2- **Indiquer** les modifications observables lors de la contraction.

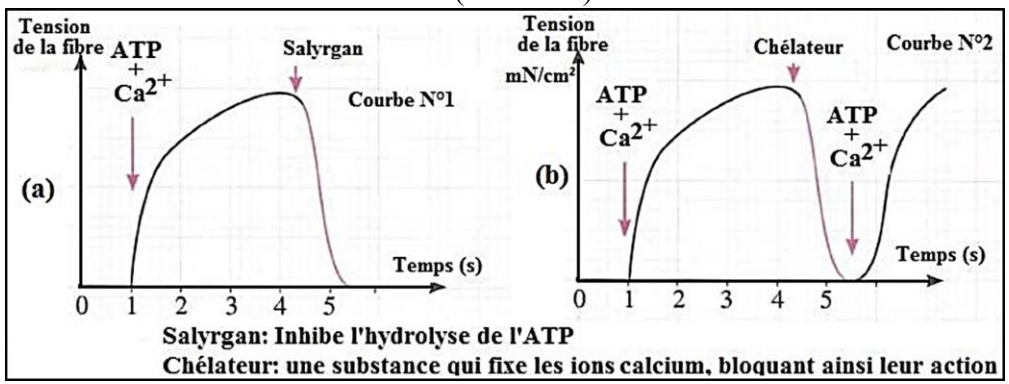
Activité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire

Doc 2 : les conditions de la contraction musculaire

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- **Analyser** les conditions expérimentales.

2- **Déduire** les conditions nécessaires à la contraction musculaire.

Doc 3 : l'importance de l'ATP

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

Tableau 1

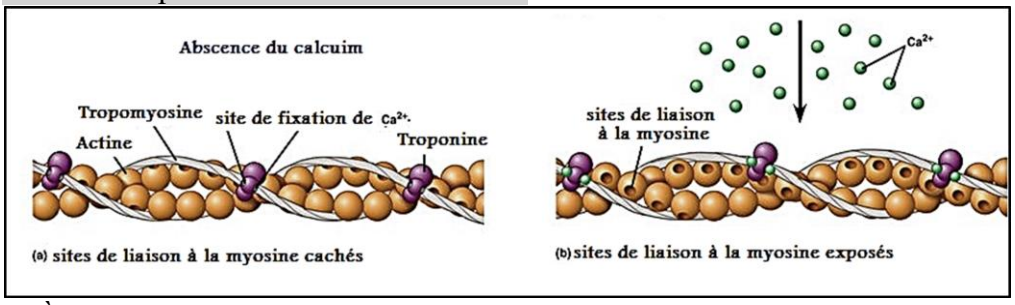
Milieux expérimentaux	Constituants du milieu	
	Début de l'expérience	Fin de l'expérience
Milieu 1	myofilaments d'actine + ATP + Ca^{++}	myofilaments d'actine + ATP + Ca^{++}
Milieu 2	myofilaments de myosine + ATP + Ca^{++}	myofilaments de myosine + ATP + Ca^{++} + une faible quantité d'ADP et de Pi
Milieu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

N.B : Après la formation des complexes d'actomyosine, on note un glissement des myofilaments d'actine sur les myofilaments de myosine (contraction musculaire).

1- À l'aide de document ci-dessus, **montrer** l'importance de l'ATP.

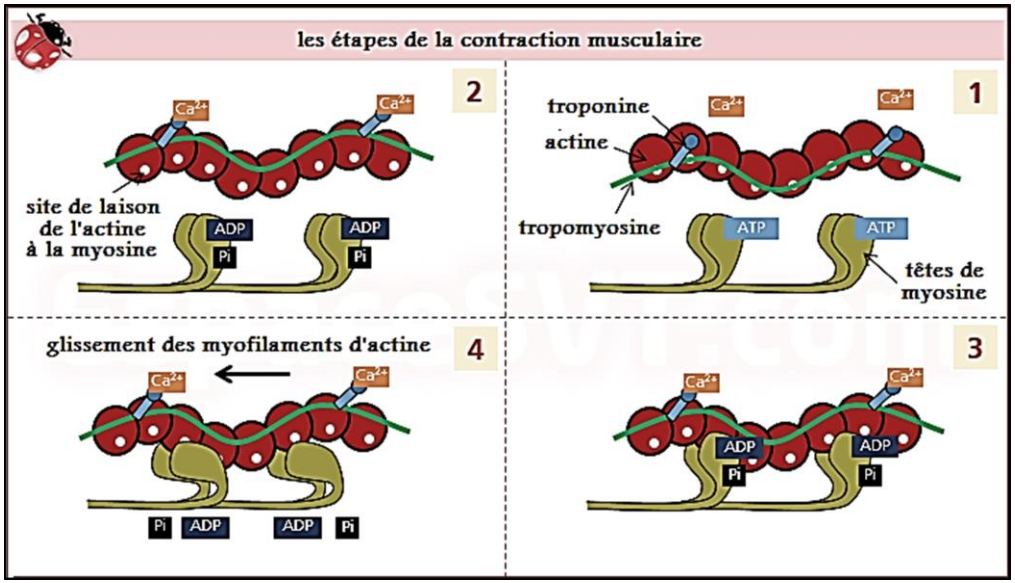
Activité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire

Doc 4 : l'importance des ions de calcium



1- À l'aide de document ci-dessus, **montrer** l'importance du calcium.

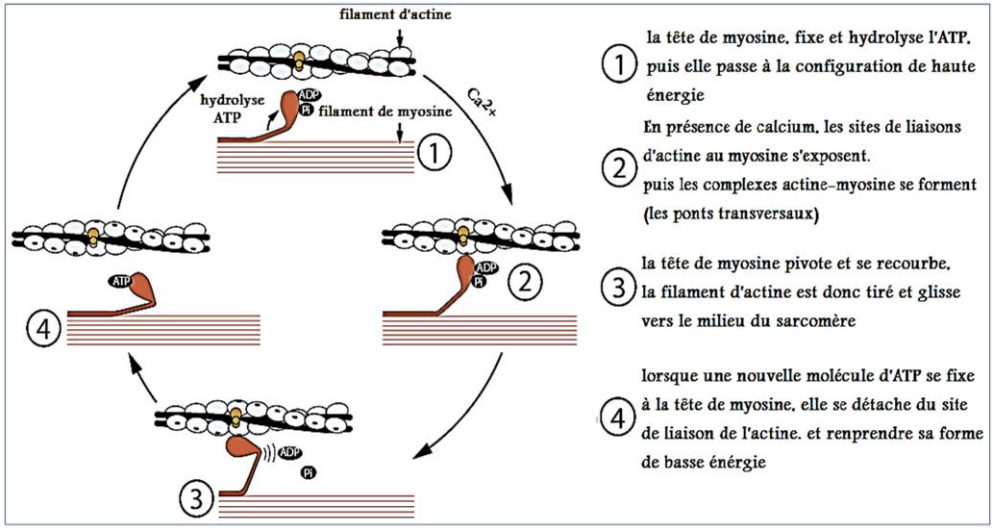
Doc 5 : les étapes de la contraction musculaire



1- **Décrire** brièvement les étapes de la contraction musculaire

Activité 3 : Mécanisme de la contraction musculaire

Bilan



Activité 4 : La régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire

L'ATP est l'unique source d'énergie utilisable pour la contraction des cellules musculaires. Les réserves cellulaires d'ATP sont très faibles, de sorte que l'ATP doit être sans cesse régénérée dans la cellule musculaire pour entretenir sa contraction.

Quelles sont les vois métaboliques permettant la régénération de l'ATP pendant la contraction musculaire ?

Doc 1 : Composition chimique d'un muscle avant et après contraction

	Avant contraction	Après contraction
Quantité d'ATP	4 à 6 mmol/kg de muscle	4 à 6 mmol/kg de muscle
Quantité de glycogène	1,6 g/100 g de muscle	0,6 g/100 g de muscle

1- **Comparer** la quantité d'ATP et de glycogène avant et après la contraction

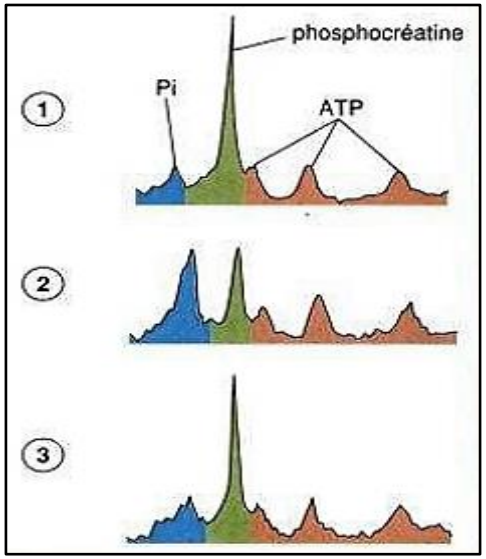
2- que peut-on **Conclure**

Activité 4 : La régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire

Doc 2 : régénération de l'ATP par voie anaérobie alactique

Il est possible de suivre dans le muscle vivant l'évolution des quantités de phosphate inorganique (Pi), d'ATP et d'une autre molécule phosphorylée : la phosphocréatine. Les enregistrements ci-contre ont été réalisés avant l'effort (1), à la fin d'un effort intense de 2 minutes (2) et après quatre minutes de récupération (3).

Sur les enregistrements obtenus, l'amplitude des pics est proportionnelle à la quantité de ces molécules. (L'ATP correspond à 3 pics car la technique – détecte les atomes de phosphore – et la molécule d'ATP en possède 3)



1- **Décrire** l'évolution des taux de phosphocréatine et d'ATP au cours de cette expérience

Sachant que le muscle possède une enzyme qui catalyse l'hydrolyse de la phosphocréatine en créatine et Pi ; cette hydrolyse est très exoénergétique.

$$PC + ADP \text{ ----- } ATP + C$$

2- **Interpréter** les variations des quantités des molécules phosphorylées au cours de cette expérience.

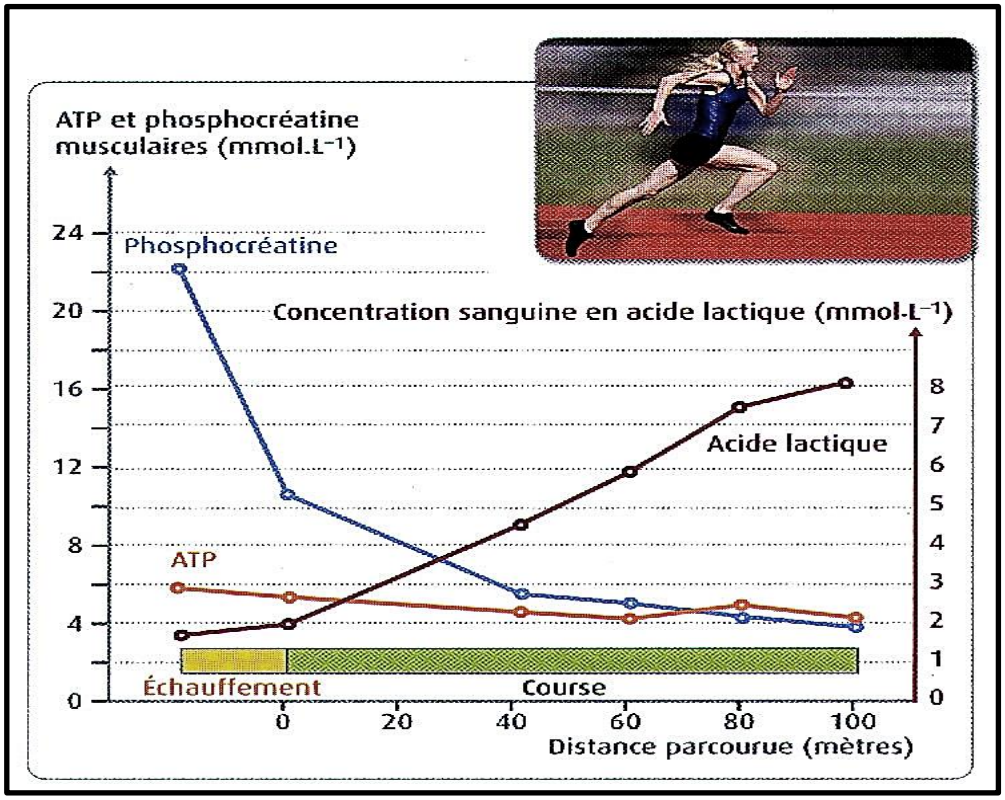
Doc 3 : régénération de L'ATP par voie anaérobie lactique

Evolution de quelques paramètres musculaires et sanguins au cours d'un sprint : on mesure les concentrations musculaires en ATP et en phosphocréatine, ainsi que la concentration sanguine en acide lactique, lors d'un exercice constitué d'un échauffement et d'une course de 100 m (durée 10 secondes environ)

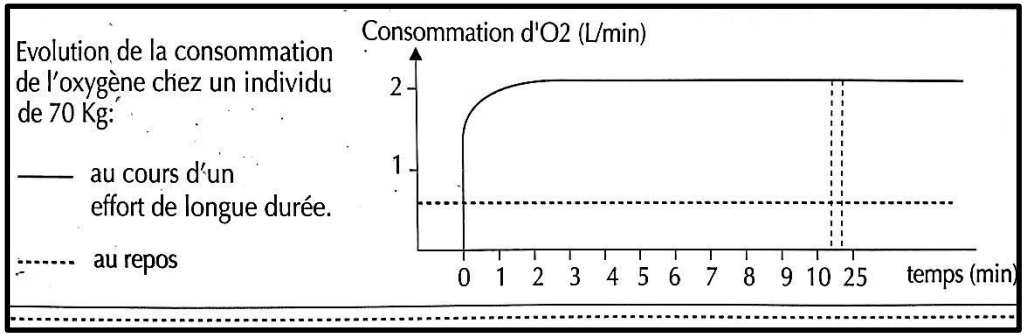
1- **Analyser** les résultats obtenus

2- **Déduire** la voie métabolique permettant la régénération de L'ATP

Activité 4 : La régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire



Doc 4 : régénération de l'ATP par voie aérobie



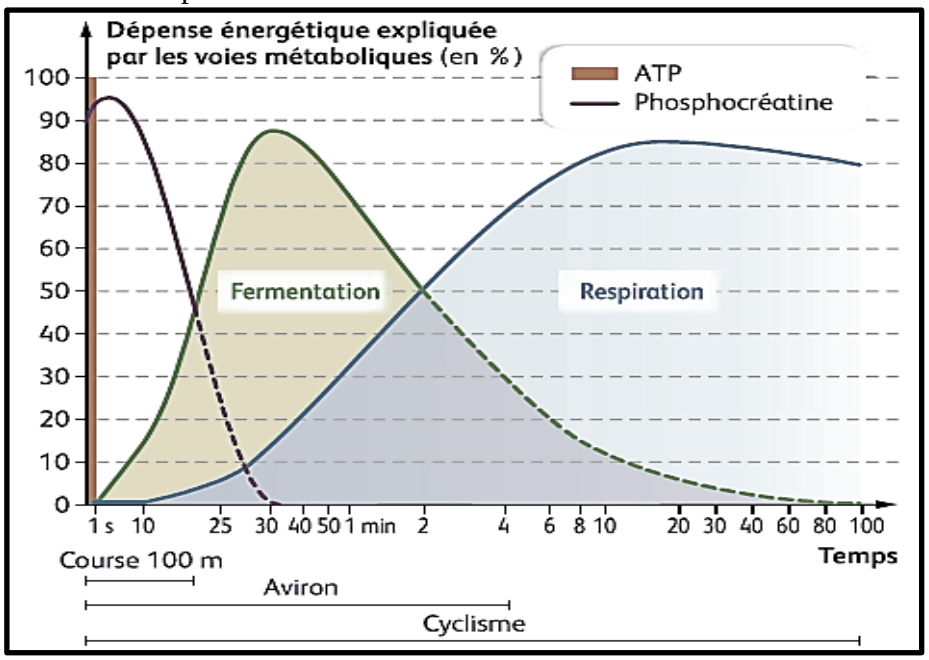
1- **Analyser** les résultats obtenus

2- **Déduire** la voie métabolique permettant la régénération de L'ATP

Activité 4 : La régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire

Doc 5 : source énergétique de la fibre musculaire selon la durée de l'exercice

L'étude du métabolisme des fibres musculaire chez des sportifs montre que les individus pratiquant des sports d'endurance comme le marathon, le cyclisme ou le ski de fond régénèrent l'ATP essentiellement par respiration alors que ceux pratiquant des sports avec des efforts brefs et intenses comme l'haltérophilie ou des courses et nages sur moins de 200 m régénèrent l'ATP essentiellement par fermentation



1- **Montrer**, en exploitant le document la relation entre la voie métabolique de régénération de l'ATP et l'intensité de l'effort associées aux particularités de chaque activité sportif.