

Mise en situation



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.

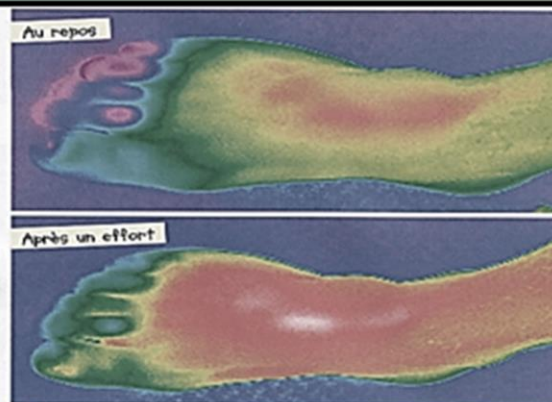


Les carburants des fibres musculaires

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



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



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

Problématique du chapitre :

Comment l'énergie chimique de l'ATP est convertie en énergie mécanique ?

Quelle est la structure et l'ultrastructure du muscle squelettique strié ?

Quelle est le mécanisme de la contraction musculaire ?

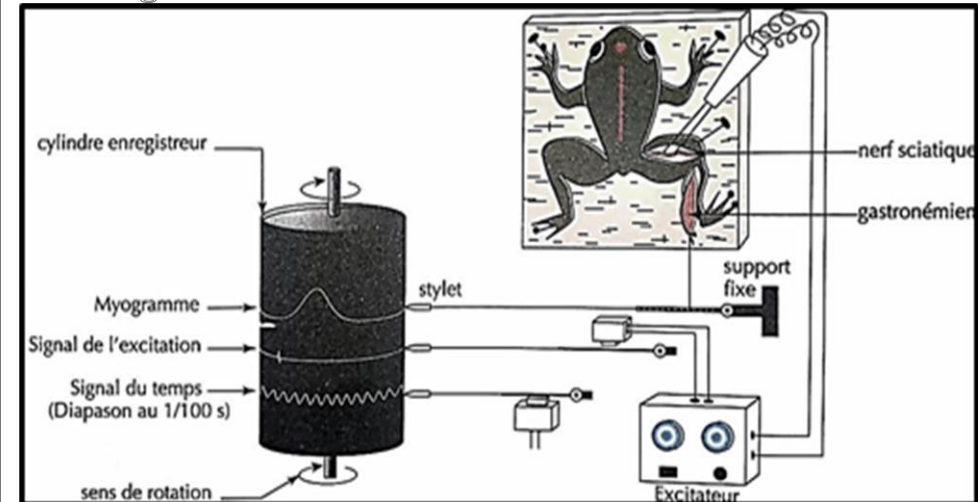
Comment l'ATP est-il régénéré ?

I - 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 ?

1- Enregistrement des contractions musculaires



2- Enregistrements des réponses du muscle à des stimulations électriques :

a-Réponse mécanique du muscle à une excitation isolée

Analyser l'enregistrement obtenu

La stimulation efficace d'un muscle, engendre une contraction isolée et très brève (0.1s), c'est la secousse musculaire.

2- Déterminer les différentes phases d'une secousse musculaire

La secousse musculaire comprend trois phases :

La phase de latence : temps qui s'écoule entre le moment de la stimulation et le début de la réponse musculaire

La phase de contraction : au cours de laquelle le muscle se raccourcit

La phase de relâchement : le muscle récupère ses dimensions initiales

b- Réponse musculaire à une série de stimulation efficace successives et d'intensité croissante

1- Analyser l'enregistrement obtenu

La stimulation par une intensité inférieure à 2 ne provoque pas la contraction
A partir l'intensité 2 et jusqu'à I6 : on obtient des secousses musculaires isolées, dont les amplitudes sont croissantes on fonction de l'intensité des stimulations
Au-delà de l'intensité I6 : l'amplitude des secousses musculaires reste constante malgré l'intensité croissante des stimulations.

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

L'intensité I1 est inefficace

L'intensité I2 est une Rhéobase : Intensité minimale nécessaire pour déclencher une contraction musculaire.

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

Le muscle est constitué par plusieurs unités motrices contractiles (fibres musculaire)

Le nombre des unités qui se contractent augmente suivant l'intensité de l'excitation ce qui fait élevée l'amplitude des contractions

Quand toutes les unités motrices sont contractées, l'amplitude des contractions demeure constante

c- Réponse du muscle à deux excitations successives

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

- Quand les 2 stimulations sont suffisamment éloignées on enregistre deux secousses musculaires isolées et de même amplitude.

- Quand les deux stimulations sont rapprochées, les deux secousses musculaires fusionnent incomplètement, avec une augmentation de l'amplitude de la 2eme secousse.

- Quand les deux stimulations sont très rapprochées, les deux secousses fusionnent complètement en une seule secousse de grande amplitude.

2- Interpréter les myogrammes obtenus.

- Si la stimulation survienne après la contraction musculaire, le résultat sera une secousse musculaire identique à la première.

- Si la stimulation est survenue pendant la phase de relâchement, les secousses fusionnent incomplètement

- Si la stimulation survienne pendant la phase de contraction, les secousses fusionnent complètement

d- Réponse du muscle à des excitations successives

Analyser les enregistrements obtenus

- Quand la fréquence des excitations est faible, le myogramme obtenu présente des oscillations successives.

- Quand la fréquence des excitations est élevée, le myogramme obtenu présente un plateau rectiligne.

2- Expliquer le tétanos parfait et le tétanos imparfait

- Si chaque excitation se produit pendant la phase de relâchement de la secousse musculaire relative à l'excitation précédente, les secousses fusionnent incomplètement : c'est le tétanos imparfait.

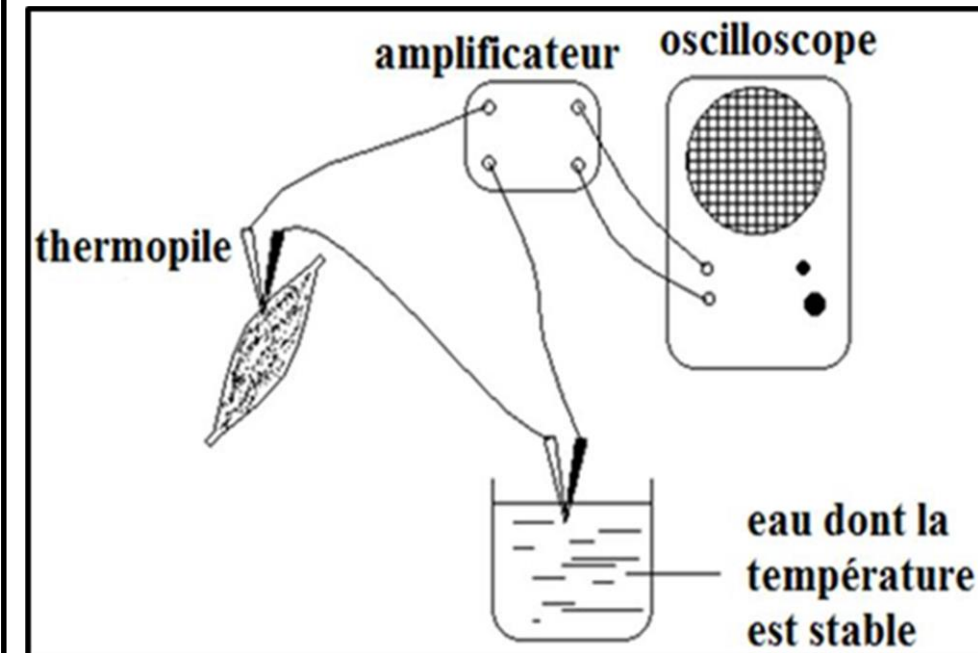
- Si chaque excitation se produit pendant la phase de contraction de la secousse musculaire relative à l'excitation précédente, les secousses fusionnent complètement : c'est le tétanos parfait.

II - 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 ?

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



2- Enregistrement des manifestations thermiques de la contraction musculaire

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

En aérobiose, la contraction musculaire dégage la chaleur en deux tranches :

Une grande quantité dite initiale

Une faible quantité dite retardée

En anaérobiose, seule la chaleur initiale est dégagée

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

Le dégagement de la chaleur au cours d'une activité mécanique confirme que le muscle est le siège des réactions chimiques exothermiques (productrices d'énergie thermique)

Réactions chimiques exothermiques aérobies (la respiration cellulaire) qui dégagent la chaleur retardée

Réactions chimiques exothermiques anaérobies (la fermentation) qui dégagent la chaleur initiale.

III - 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 connaître 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

- Le muscle squelettique est un muscle relié au squelette par son tendon
- Le muscle squelettique est composé d'un ensemble de faisceaux musculaires séparés par un tissu conjonctif
- Chaque faisceau musculaire est constitué de plusieurs fibres musculaires
- chaque fibre musculaire contient des organites cylindriques, les myofibrilles qui contiennent à leurs tours des myofilaments

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

Une fibre musculaire est une cellule géante qui possède plusieurs noyaux (cellule plurinucléée), limités par une membrane (sarcolemme).

Le cytoplasme est dénommé sarcoplasme

Doc 3 : vue en coupe de la fibre musculaire

✚ **décrire** la structure microscopique d'une fibre musculaire

✚ **justifier** pourquoi dit-on que le muscle squelettique est strié

- La coupe longitudinale montre des striations transversales régulières, correspond à une succession de **bandes sombres** et de **bandes claires**.

D'où le qualificatif de muscle strié donné à ce type de muscle.

La coupe transversale montre que le sarcoplasme apparaît rempli de petits cylindres, les myofibrilles, éléments contractiles du muscle squelettique.

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

- chaque myofibrille est entourée de réticulum sarcoplasmique

- les tubules transverses sont des replis du sarcolemme qui pénètrent profondément la fibre musculaire

- les mitochondries sont disposées entre les myofibrilles

Doc 5 : observation microscopique des myofibrilles

- chaque myofibrille présente une alternance de bandes claires et de bandes sombres.

- Chaque myofibrille est organisée en unités répétitives, sarcomères représentant l'unité fonctionnelle du muscle strié squelettique.

- chaque sarcomère est comprise entre deux lignes sombres (lignes Z) qui divisent deux bandes claires successives

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

✚ **décrire** les coupes transversales

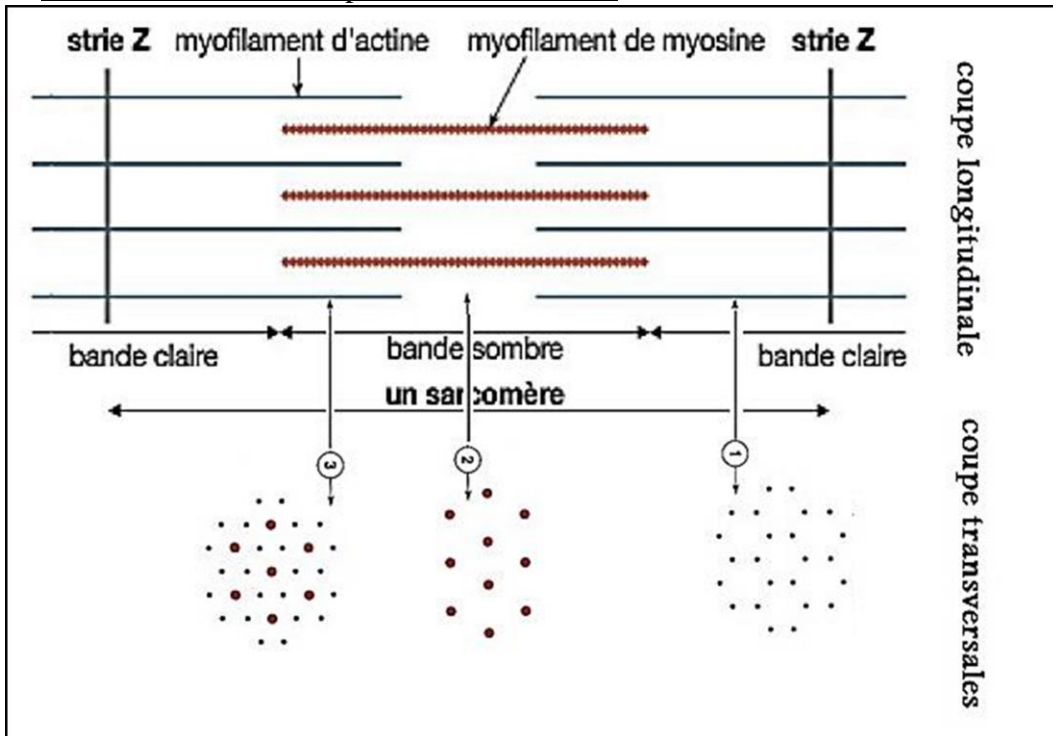
L'ultrastructure du sarcomère révélée par le microscope électronique permet d'identifier :

Au niveau 1 : des disques minces, ce sont les myofilaments minces d'actine

Au niveau 3 : des disques épais, ce sont les myofilaments épais de myosine

Au niveau 2 : alternance de disques minces et épais, correspond à une zone de recouvrement entre les filaments d'actine et de myosine

réaliser un schéma interprétatif du sarcomère



Doc 7 : organisation moléculaire des sarcomères

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

- Les filaments d'actine sont formés par des molécules d'actines globulaires assemblées en hélice, associées à deux autres protéines : la tropomyosine et la troponine
- Le filament épais de myosine est constitué de plusieurs molécules de myosine. Chaque molécule de myosine est constituée d'un bâtonnet (=queue) et deux têtes possédant une activité ATPase

Bilan :

- Les muscles sont constitués de fibres musculaires qui contiennent dans leur cytoplasme des assemblages des myofibrilles. Ces myofibrilles sont organisées en unités répétitives, les sarcomères.
 - Au sein de chaque sarcomère, on distingue deux types de myofilaments : des myofilaments fins (constitués de protéines d'actine) et des myofilaments épais (constitués de protéines de myosine).
- Les myofilaments fins sont disposés de part et d'autre d'une strie Z. Entre les myofilaments fins se situent les myofilaments épais.

IV - 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 ?

1- Mise en évidence du glissement des myofilaments d'actines

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

Indiquer les modifications observables lors de la contraction.

- Le sarcomère se raccourcit, sans raccourcissement de la longueur des myofilaments
- La bande claire et la zone H se raccourcissent, et les stries Z se rapprochent
- La longueur de la bande sombre reste inchangée pendant la contraction
- Le raccourcissement du sarcomère est dû au glissement des myofilaments d'actine vers le centre du sarcomère

2- Les conditions de la contraction musculaire

Analyser les conditions expérimentales.

- Expérience a: L'augmentation de tension montre une contraction L'ajout de salyrgan entraîne une diminution de la tension donc l'absence de contraction.
- Expérience b: La présence de chélateur entraîne une diminution de la tension donc l'absence de contraction. Un nouvel ajout de Ca²⁺ provoque une augmentation de la tension.

Dédire les conditions nécessaires à la contraction musculaire.

L'hydrolyse de l'ATP est indispensable à la contraction car elle libère de l'énergie.

Le Ca²⁺ est indispensable à la contraction.

a- L'importance de l'ATP

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

L'ATP est utilisée lors de la contraction musculaire au niveau des têtes de myosine. L'hydrolyse de l'ATP permet la fixation de la myosine sur l'actine puis un glissement des filaments d'actine le long des filaments de myosine des sarcomères.

b- L'importance des ions de calcium

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

En l'absence de Ca^{2+} , la troponine ne fixe pas de Ca^{2+} , la tropomyosine occupe une position telle que les sites de fixation de la myosine sur l'actine sont masqués.

-A la suite d'un flux de Ca^{2+} la troponine fixe ce Ca^{2+} , ce qui provoque le déclenchement d'une rotation de la tropomyosine autour de l'actine. Les sites de fixation de la myosine sur l'actine deviennent libres et accessibles.

-En présence de calcium, le masque produit par la tropomyosine est donc levé.

Les étapes de la contraction musculaire

3- Les étapes de la contraction musculaire

✚ **Décrire** brièvement les étapes de la contraction musculaire

Étape 1 : au repos (avant Arrivée de l'influx nerveux), la troponine masque le site de liaison de la myosine avec l'actine. Une molécule d'ATP est liée à la tête de myosine.

Étape 2 : suite à L'arrivée de l'influx nerveux, le réticulum sarcoplasmique libère, dans le sarcoplasme, des ions calcium qui se fixent à la troponine.

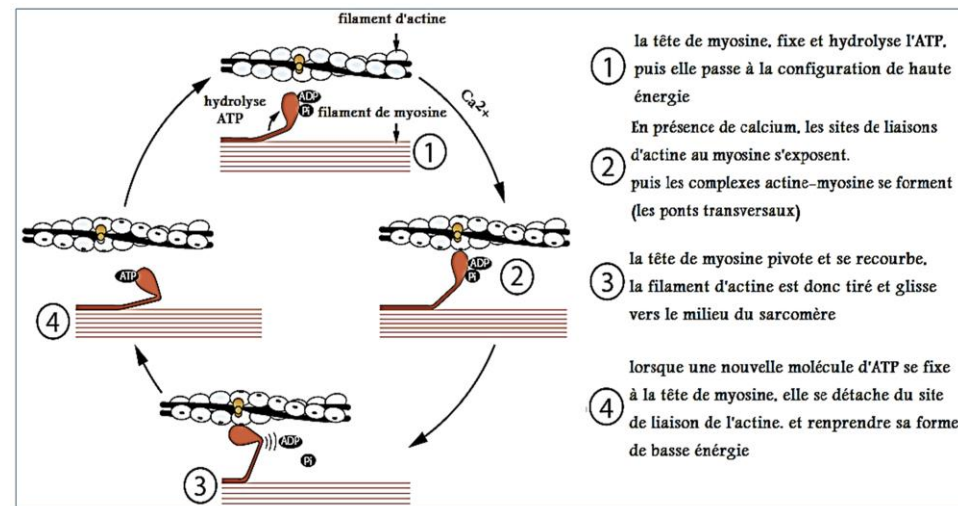
Cette fixation induit un changement de conformation de la troponine qui permet le démasquage du site de fixation de l'actine à la myosine.

En présence de calcium, l'ATP est hydrolysé en ADP et P_i , par ATPase de la myosine. Elle passe alors à la configuration de haute énergie.

Étape 3 : suite au démasquage du site de fixation de l'actine à la myosine. Les complexes actine-myosine se forment.

Étape 4 : L'ADP et P_i produit lors de l'hydrolyse l'ATP, quittent la tête de myosine. L'énergie fournie permet le basculement de la tête de myosine, le filament d'actine est donc tiré et glisse vers le milieu du sarcomère. Le muscle se contracte.

N.B : une nouvelle molécule d'ATP se fixe à la tête de myosine (elle passe de la configuration de haute énergie à sa forme de basse énergie), permettant son redressement et la suppression de la liaison entre l'actine et la myosine. Le muscle se relâche.



V - 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 voies métaboliques permettant la régénération de l'ATP pendant la contraction musculaire ?

	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

L'étude de la composition chimique du muscle montre que la quantité d'ATP est stable avant et après la contraction : l'ATP est donc régénéré très rapidement.

1- régénération de l'ATP par voie anaérobie alactique

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

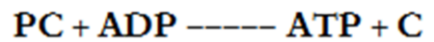
- au cours de l'effort la quantité d'ATP est constante (les trois pics d'ATP ont la même amplitude au cours de l'effort).

- le taux important de phosphocréatine (créatine phosphorylée) au début de l'effort, diminue rapidement. Parallèlement, le taux de phosphate inorganique, faible au départ, augmente au cours de l'effort.

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

L'hydrolyse de la phosphocréatine est une source d'énergie pour la production d'ATP.

C'est une régénération immédiate de l'ATP à partir d'un composé présent dans le cytosol : la phosphocréatine.



Cette production d'énergie est très rapide mais ne dure qu'environ 60 secondes. Cette voie donne assez d'énergie pour un effort de courte durée.

2- régénération de L'ATP par voie anaérobie lactique

Analyser les résultats obtenus

- La quantité d'ATP est relativement stable dans le temps.
- La concentration en phosphocréatine diminue fortement pendant l'échauffement et de manière moins intense pendant la course.
- Lors de l'effort, la concentration en acide lactique augmente. Cette augmentation est faible pendant l'échauffement puis elle s'intensifie.

Déduire la voie métabolique permettant la régénération de L'ATP

La fermentation lactique prend le relai de la voie de la phosphocréatine, comme en témoigne l'augmentation de la concentration sanguine d'acide lactique lors d'un effort intense.

Cette voie métabolique anaérobie permet de produire seulement 2 molécules d'ATP par molécule de glucose consommée.

3- régénération de l'ATP par voie aérobie

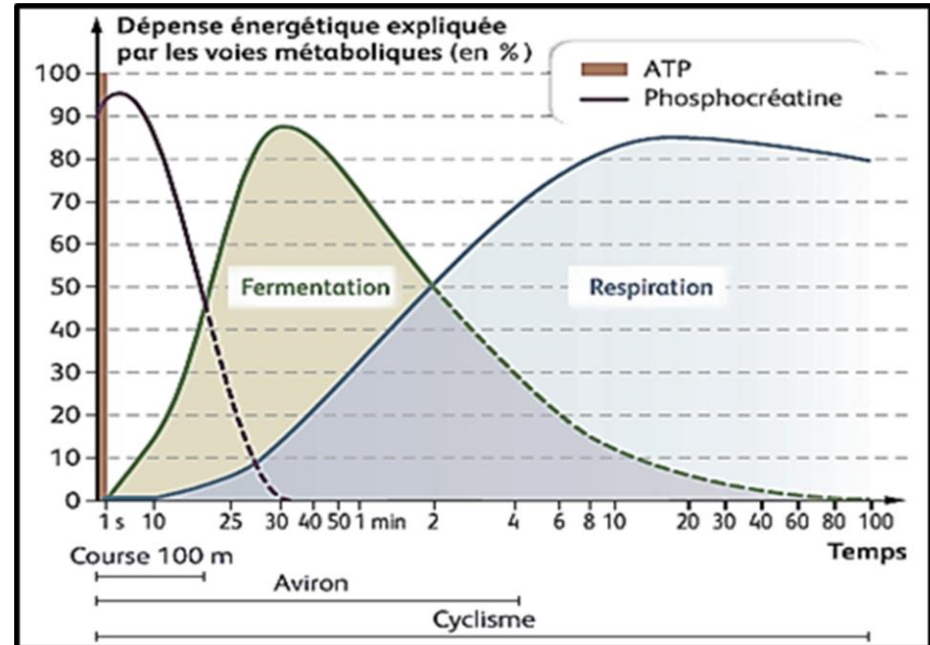
Analyser les résultats obtenus

- Au repos, la consommation de dioxygène ne dépasse pas 1L/min.
- Au cours d'un effort musculaire de longue durée, la consommation de l'O2 augmente rapidement puis se stabilise à une valeur maximale égale à 2 L/min.

Déduire la voie métabolique permettant la régénération de L'ATP

Pour un effort musculaire durable, l'ATP est principalement produit par la respiration cellulaire, qui permet de produire beaucoup plus d'ATP par molécule de glucose utilisée.

Bilan



Au cours d'un effort très bref mais très puissant, la voie anaérobie alactique, assure quasiment toute la régénération de l'ATP. Son apport diminue rapidement pour s'annuler vers 30 secondes d'effort.

Pour un effort moins intense, mais qui ne peut se prolonger plus de 2 minutes. La voie anaérobie lactique contribue de plus à la régénération de l'ATP, pour en assurer 90 % au bout de 40 secondes.

Le métabolisme aérobie est lent à atteindre son efficacité maximale (15 minutes environ) mais ensuite il peut assurer la régénération de l'ATP pendant un temps prolongé à forte intensité de l'effort.

Une cellule musculaire consomme de très nombreuses molécules d'ATP. Elle régénère ces molécules grâce à trois voies métaboliques.

	Voie 1 : anaérobie alactique	Voie 2 : anaérobie lactique	Voie 3 : aérobie
Substrats utilisés	Créatine phosphate + ADP	Glucose ou autres substrats + ADP	Glucose ou autres substrats + O ₂ + ADP
Produits formés	Créatine + ATP	Acide lactique + ATP	H ₂ O + CO ₂ + ATP