

# Thème : Energie et cellule vivante

## Chapitre 3 : l'utilisation de l'ATP par la fibre musculaire

### I – Production d'énergie par la fibre musculaire

#### Comment la fibre musculaire se procure-t-elle l'énergie dont elle a besoin ?

Livre, p.56-57exercice

*Tout processus biologique qui nécessite de l'énergie utilise de l'ATP.*

*Le document 1 apporte la preuve de la nécessité de l'ATP pour la contraction musculaire.*

*En effet, dans cette expérience, la fibre est placée dans une solution ionique. Le facteur que l'on fait varier est la présence ou l'absence d'ATP. En présence d'ATP, on constate un raccourcissement de la portion de fibre, qui passe de 60  $\mu\text{m}$  environ à 50  $\mu\text{m}$ . Ce raccourcissement montre que la fibre s'est contractée. La présence d'ATP est donc nécessaire à la contraction d'une cellule musculaire.*

*Le document 2 amène à réfuter une hypothèse qui aurait pu apparaître plausible, à savoir celle d'une abondance des réserves d'ATP dans la cellule musculaire.*

*L'étude du graphique montre cependant que le « stock » d'ATP, aussi faible soit-il, ne s'épuise pas immédiatement. C'est la phosphocréatine qui permet de régénérer immédiatement et en permanence ce stock d'ATP. Cependant, on constate que ce processus est limité à une brève période de temps (quelques dizaines de secondes tout au plus).*

*Le document 3 montre que le muscle utilise les deux processus producteurs d'ATP : la respiration, bien entendu, mais aussi la fermentation.*

*Comme le montre le premier graphique, on constate généralement au cours d'un effort l'intervention successive de trois voies métaboliques (voie de la phosphocréatine, fermentation, respiration,) susceptibles de fournir au muscle de l'ATP.*

*Dans un premier temps, c'est la phosphocréatine qui intervient : en effet, cette voie permet une production immédiate d'ATP. Cependant, cet approvisionnement ne peut pas être soutenu dans le temps.*

*Très « rapidement », l'ATP est fourni par fermentation lactique.*

*Le métabolisme respiratoire intervient ensuite, car il nécessite un approvisionnement accru des cellules musculaires en dioxygène, ce qui suppose une adaptation cardio-ventilatoire (augmentation des rythmes cardiaque et respiratoire) qui nécessite du temps pour s'installer.*

*On constate donc que, suivant le type d'exercice, la part prise par ces trois voies est différente :*

- Dans le cas d'un exercice violent mais extrêmement bref, comme l'haltérophilie, seule la voie de la phosphocréatine intervient. Notons cependant que les autres voies métaboliques seront nécessaires après cet effort pour restaurer les stocks utilisés.*
- Au cours d'une course brève (100 à 400 m), la voie de la fermentation lactique est prépondérante car la phosphocréatine est vite épuisée et la voie respiratoire n'a pas le temps de s'installer au cours de l'effort.*
- Au cours d'un exercice prolongé, la voie respiratoire assure durablement la production d'ATP, car c'est le système le plus efficace (meilleur rendement, pas de production d'acide lactique).*

*Le graphique relatif au nageur de haut niveau montre cependant que la fermentation lactique intervient également lorsque l'effort imposé est très important, lorsqu'il dépasse les capacités maximales d'approvisionnement en dioxygène.*

*Il est intéressant de remarquer que le métabolisme anaérobie lactique (fermentation) permet une production d'ATP avant même que l'adaptation du système cardio-ventilatoire apporte aux cellules musculaires le surplus de dioxygène nécessaire. Il permet aussi un apport supplémentaire d'énergie lorsque le système respiratoire atteint ses capacités maximales.*

*Cette voie métabolique présente des inconvénients : accumulation d'acide lactique (cause d'une acidose musculaire) et rendement faible, qui suppose de grosses réserves de glycogène. Les conséquences d'une accumulation d'acide lactique semblent être la diminution du pH qui constitue la principale cause de fatigue musculaire : pour un pH inférieur à 6,4, l'action des enzymes intervenant dans la production d'ATP (glycolyse notamment) est quasiment stoppée, ce qui conduit rapidement à l'épuisement. L'épuisement des stocks de glycogène peut aussi être un facteur limitant (cas des exercices prolongés).*

La contraction musculaire ne peut se faire sans ATP, or la concentration d'ATP dans les cellules musculaires est très faible. L'ATP doit donc être sans cesse régénéré au fur et à mesure de sa consommation. Les voies de production d'ATP se font par oxydation de molécules organiques comme le glucose stocké dans l'organisme sous forme de glycogène. Selon l'intensité et la durée de la contraction musculaire, l'une ou l'autre des trois voies de régénération de l'ATP est privilégiée.

\* **Au cours des premières minutes d'effort**, la régénération de l'ATP se fait surtout par des voies anaérobies :

\_ La **voie de la phosphocréatine** permet une production d'ATP très rapide, car la phosphocréatine stockée dans le cytoplasme peut transférer un groupement phosphate à l'ADP, grâce à un couplage énergétique chimiochimique ;

\_ Après épuisement de la phosphocréatine la **fermentation lactique** prend le relai, ce qui permet de produire seulement 2 molécules d'ATP (lors de la glycolyse) par molécule de glucose oxydée partiellement.

\* **Après quelques minutes d'effort**, nécessaires à l'adaptation du système cardiovasculaire et respiratoire, les cellules musculaires, possédant de nombreuses mitochondries, sont correctement approvisionnées en dioxygène. L'ATP est alors principalement régénéré par la voie métabolique aérobie de la respiration cellulaire, qui permet de produire 36 molécules d'ATP par molécule de glucose oxydée.

**La fibre musculaire utilise l'ATP fourni, selon les circonstances, par la voie métabolique de la phosphocréatine, la respiration ou la fermentation.**

Les avantages et inconvénients des différentes voies métaboliques peuvent être comparés sous forme d'un tableau.

	Avantages	Inconvénients
<b>Voie de la phosphocréatine</b>	ATP instantanément disponible : permet un effort immédiat.	Stock très faible, intervention limitée aux premières dizaines de seconde d'un effort physique.
<b>Fermentation lactique</b>	ATP produit rapidement. Ne nécessite pas d'approvisionnement en dioxygène. Production rapide d'ATP, production possible au-delà des capacités maximales d'apport en dioxygène.	Rendement faible (consommation très importante des réserves de glycogène), production d'acide lactique à l'origine d'une fatigue musculaire, voire d'un épuisement.
<b>Respiration</b>	Rendement élevé, production d'ATP importante et durable, pas de production d'acide lactique.	Nécessite le temps d'adaptation des systèmes cardiaque et ventilatoire permettant l'accroissement de l'apport en dioxygène. Production d'ATP limitée par les capacités maximales d'approvisionnement en dioxygène (VO <sub>2</sub> max).

## II – Intervention de l'ATP dans le mécanisme de contraction musculaire

### A – Organisation fonctionnelle de la fibre musculaire

livre, p. 58-59

*La présence de plusieurs noyaux, relégués en périphérie, doit être mise en relation avec la dimension, inhabituelle pour une cellule, de la fibre musculaire : en effet, la fibre musculaire résulte de la fusion de nombreuses cellules.*

*Dessin ou la photographie faisant apparaître, sans ambiguïté, qu'une fibre est une cellule, avec membrane cellulaire, cytoplasme (d'aspect strié), noyaux situés en périphérie du cytoplasme, plaqués contre la membrane plasmique.*

*Le document 2 présente l'ultrastructure de la fibre musculaire.*

Le cytoplasme d'une fibre musculaire est essentiellement occupé par des filaments protéiques disposés parallèlement à l'allongement de la fibre. Un ensemble de filaments constitue ce qu'on appelle une myofibrille : chaque myofibrille est une succession de sarcomères et montre donc une alternance de bandes sombres (comportant des filaments épais) et de bandes claires (ne comportant que des filaments fins). Or, les différentes myofibrilles d'une fibre sont disposées de telle sorte que les bandes claires et sombres sont alignées : on retrouve donc l'aspect strié au niveau de la fibre tout entière.

#### **Schéma de l'ultrastructure du sarcomère à connaître**

Les coupes transversales présentées ici montrent les deux types de filaments : les filaments de **myosine**, plus épais, apparaissent comme des cercles sombres, les filaments fins d'**actine** comme de simples points, de plus petit diamètre.

Les bandes claires ne comportent que des filaments d'actine alors que les bandes sombres comportent des filaments de myosine. La partie centrale d'une bande sombre ne comporte que des filaments de myosine alors que les deux extrémités de chaque bande sombre comportent les deux types de filaments. Or, les filaments d'actine sont fins alors que les filaments de myosine sont plus épais. En conséquence :

- les zones qui ne comportent que des filaments d'actine apparaissent claires alors que les zones qui comportent des filaments de myosine apparaissent globalement sombres ;
- dans une bande sombre, la partie centrale (qui ne comporte que des filaments de myosine) apparaît légèrement moins foncée que les deux extrémités (qui comportent les deux types de filaments).

Pour aller plus loin :

La zone plus claire d'une bande sombre est communément appelée « bande H ». Il est facile de comprendre que cette partie centrale (qui ne comporte que des filaments de myosine) apparaît moins sombre que les deux extrémités de la bande sombre (qui comportent les deux types de filaments). Cependant, l'axe de cette bande H apparaît au contraire très foncé (c'est ce qu'on appelle la ligne M) : cet aspect est dû à la présence, à ce niveau, d'une enzyme, la créatine kinase ou créatine phosphokinase (CPK).

C'est cette enzyme qui catalyse la réaction : Phosphocréatine, ADP, ATP

Les muscles striés (présentant des stries) squelettiques (qui permettent le mouvement du squelette) sont constitués d'un ensemble de cellules musculaires appelées fibres musculaires disposées parallèlement. La contraction des muscles squelettiques se fait grâce au raccourcissement des cellules musculaires qui les constituent.

- Les **fibres musculaires** sont des cellules géantes très allongées (pouvant atteindre plusieurs centimètres de long) qui renferment dans leur cytoplasme plusieurs noyaux et mitochondries ainsi que de nombreuses myofibrilles.

- Les **myofibrilles** sont des structures cylindriques et parallèles, qui présentent au microscope une alternance de bandes sombres et de bandes claires, ce qui donne l'aspect strié à la fibre musculaire. Les myofibrilles sont des structures contractiles de nature protéique. Elles sont constituées d'une succession d'unités fonctionnelles, les sarcomères.

- Chaque **sarcomère**, délimité par les stries Z, contient des myofilaments fins d'actine et des myofilaments épais de myosine disposés parallèlement. Lors de la contraction musculaire, les sarcomères raccourcissent, bien que la longueur des myofilaments ne varie pas : il y a glissement des myofilaments fins d'actine le long des myofilaments épais de myosine. À l'échelle moléculaire, la contraction musculaire se fait donc par déplacement relatif des protéines qui forment les myofilaments.

## **B – Les mécanismes de la contraction musculaire**

Livre, p. 60-61

La connaissance suffisamment précise de la structure d'une fibre musculaire permet maintenant d'envisager, aussi simplement que possible, le mécanisme moléculaire de la contraction afin de comprendre comment l'ATP intervient dans ce mécanisme.

Le **document 1** présente deux électrographies montrant un raccourcissement du sarcomère, raccourcissement que l'on peut quantifier : ici, le sarcomère passe d'une longueur de 2,3  $\mu\text{m}$  à une longueur de 1,8  $\mu\text{m}$ , soit un raccourcissement de 20 % environ.

Dans son état contracté, le sarcomère apparaît plus court (1,8  $\mu\text{m}$ ) que dans son état relâché (2,3  $\mu\text{m}$ ). On peut remarquer que ce sont les bandes claires qui sont plus courtes. La bande sombre a conservé sa longueur. On remarque aussi que la partie centrale de la bande sombre est réduite. Dans le sarcomère contracté, la totalité de la bande sombre

est constituée des deux filaments, actine et myosine. Cela signifie que les deux stries Z se sont rapprochées, les filaments fins d'actine ayant glissé par rapport aux filaments épais de myosine pour se rapprocher de la partie centrale du sarcomère.

Remarque :

Le sarcomère s'est raccourci de  $2,3 - 1,8 = 0,5 \mu\text{m}$  environ. Le raccourcissement d'une succession de 20 000 sarcomères sera donc de 10 mm environ.

Le **document 2** permet de préciser le **mécanisme de glissement des filaments** : l'électronographie à très fort grossissement permet de discerner l'existence de liaisons entre les filaments de myosine et d'actine. L'étude des modèles moléculaires montre comment les « têtes » de myosine sont susceptibles de se fixer sur l'actine.

Ainsi, le raccourcissement du sarcomère n'est pas dû à un raccourcissement des myofilaments. C'est le glissement des filaments d'actine et de myosine qui rapproche les deux stries Z et raccourcit le sarcomère. Ce glissement s'effectue par une succession de cycles au cours desquelles les têtes des molécules de myosine s'attachent aux filaments d'actine, pivotent et exercent une traction sur ceux-ci.

La série de 4 schémas montre les étapes d'un cycle de contraction. L'hydrolyse de l'ATP permet la fixation de la tête de myosine en amont de la position occupée au cycle précédent (repérée par la coloration des « boules » d'actine). Cependant, c'est la libération de l'ADP qui permet le glissement proprement dit, la tête de myosine reprenant alors sa conformation initiale.

La contraction d'un muscle est due à la répétition de cycles au cours desquelles les molécules de myosine s'attachent aux molécules d'actine, pivotent de façon à faire glisser le filament d'actine, se détachent puis se fixent à nouveau, mais plus en amont, sur le filament d'actine.

Ce mécanisme, plus précisément le pivotement de la tête de myosine, nécessite de l'énergie. Cette énergie est fournie par l'hydrolyse d'une molécule d'ATP venue se fixer sur la tête d'une molécule de myosine. Au cours de la contraction, il faut donc un renouvellement d'ATP pour permettre la répétition de tels cycles.

On pourra également remarquer qu'en absence d'ATP, les filaments restent attachés, car c'est la fixation de l'ATP qui permet le détachement des têtes de myosine : c'est la cause de la rigidité cadavérique (« rigor mortis »). En effet, si la production d'ATP cesse, les muscles restent dans un état contracté.

La contraction d'une fibre musculaire correspond à un glissement des myofilaments d'actine le long des myofilaments de myosine grâce à la formation de ponts d'union entre actine et myosine et la présence d'ATP. Chaque molécule de myosine possède une zone globulaire appelée « tête de myosine » capable de basculer et de s'accrocher à de l'actine selon une succession cyclique d'étapes constituant le cycle de contraction.

**Le cycle de contraction se déroule en plusieurs étapes :**

**Étape 1** : une molécule d'ATP se fixe sur la tête de myosine et provoque la rupture du pont d'union entre actine et myosine par modification de la configuration spatiale de la tête de myosine.

**Étape 2** : la tête de myosine hydrolyse l'ATP en ADP et Pi qui restent étroitement liés à la myosine. Cette hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi fournit l'énergie nécessaire à l'activation de la tête de myosine et donc à son changement d'orientation dans l'espace.

**Étape 3** : la libération du Pi de la tête de myosine entraîne l'accrochage de la tête de myosine à l'actine (= formation d'un complexe actine-myosine).

**Étape 4** : la libération de l'ADP de la tête de myosine entraîne le pivotement et un retour de la tête de myosine à sa position de repos (= coup de rame) responsable du déplacement de l'actine par rapport à la myosine.

La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur la tête de myosine entraîne de nouveau la dissociation du complexe actine-myosine et un autre cycle peut alors commencer (si l'ATP n'est pas renouvelé, les têtes de myosine ne se détachent pas de l'actine et la fibre musculaire reste contractée).

**Le mécanisme moléculaire à la base de la contraction musculaire correspond au coulisage des fibres d'actine entre les fibres de myosine. L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire.**

Lors de la contraction de la fibre musculaire, l'énergie chimique issue de l'hydrolyse de l'ATP est convertie en énergie mécanique (mouvement) au niveau de chaque sarcomère : c'est un **couplage énergétique chimiomécanique**.