

Contraction musculaire et énergie

COURS • S18 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	2
Exemples résolus	9
Méthodes et pièges	10
Vers le PASS	11
Exercices	11
Corrigés	13

Ce que tu dois savoir faire

- Décrire l'organisation d'un muscle squelettique, du muscle entier aux myofibrilles et aux sarcomères.
- Identifier les éléments d'un sarcomère (stries Z, bandes claires I, bande sombre A, zone H) et les filaments d'actine et de myosine qui les forment.
- Expliquer le raccourcissement du sarcomère par le glissement des filaments, à partir de mesures de longueurs de bandes.
- Expliquer le rôle des ions calcium et de l'ATP dans le cycle d'attachement et de détachement des têtes de myosine.
- Expliquer pourquoi la cellule musculaire doit régénérer en permanence son ATP et présenter les trois voies de régénération (phosphocréatine, fermentation, respiration).
- Décrire la respiration cellulaire (glycolyse, cycle de Krebs, chaîne respiratoire) et localiser chaque étape dans la cellule et la mitochondrie.
- Décrire la fermentation lactique et la fermentation alcoolique, écrire leurs équations bilans et comparer leur rendement à celui de la respiration.
- Relier les types de fibres musculaires (lentes et rapides) à leur métabolisme et au type d'effort.
- Décrire les adaptations de l'organisme à l'effort, immédiates (cœur, ventilation, circulation) et liées à l'entraînement.
- Exploiter des mesures (longueurs, consommation de dioxygène, dosages de métabolites, données d'effort) et réaliser des calculs de rendement.



Cours

1. L'organisation du muscle squelettique

Les **muscles squelettiques** sont fixés aux os par des **tendons**. En se contractant, un muscle se raccourcit et tire sur l'os, ce qui fait jouer une articulation. Un muscle ne peut que tirer : les mouvements reposent donc sur des **muscles antagonistes** (le biceps fléchit l'avant-bras, le triceps l'étend). On distingue aussi le muscle cardiaque (myocarde) et les muscles lisses (paroi des viscères et des vaisseaux), dont le fonctionnement repose sur les mêmes protéines contractiles ; ce chapitre traite du muscle squelettique.

Le muscle présente une organisation emboîtée :

Du muscle au sarcomère

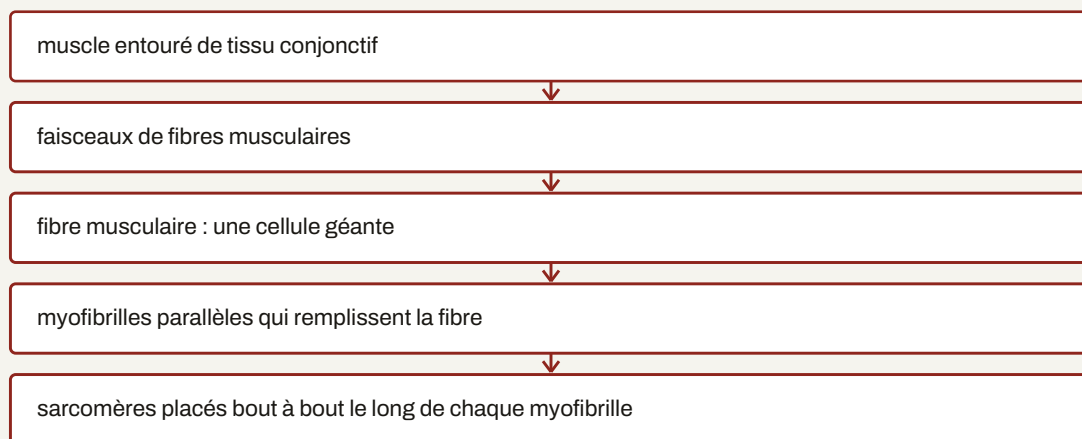


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

La **fibre musculaire** est une cellule très particulière :

- elle est très longue (de quelques millimètres à plusieurs centimètres) pour un diamètre de 10 à 100 μm ;
- elle est **plurinucléée** : elle provient de la fusion de nombreuses cellules embryonnaires, et ses noyaux sont repoussés en périphérie ;
- son cytoplasme est occupé en majorité par des **myofibrilles**, structures contractiles parallèles à l'axe de la fibre ;
- elle contient un **réticulum sarcoplasmique** très développé, réseau de sacs membranaires qui entoure les myofibrilles et stocke des ions **calcium** Ca^{2+} ;
- elle contient de nombreuses **mitochondries**, des réserves de **glycogène** (polymère de glucose) et, selon les fibres, de la **myoglobine**, protéine qui fixe le dioxygène.

Sa membrane plasmique est excitable : un potentiel d'action musculaire, déclenché à la jonction neuromusculaire par l'acétylcholine, s'y propage et pénètre en profondeur par des invaginations de la membrane (les tubules transverses), au contact du réticulum sarcoplasmique.

2. Le sarcomère, unité contractile

Au microscope optique, la fibre musculaire squelettique apparaît **striée** : une alternance de bandes sombres et de bandes claires. Le microscope électronique montre que cette striation est due à l'arrangement régulier de deux types de filaments protéiques :

- les **filaments fins d'actine**, fixés par une extrémité sur une **strie Z** ;
- les **filaments épais de myosine**, situés au centre, chaque molécule de myosine portant une **tête** capable de se lier à l'actine.

Le **sarcomère** est la portion de myofibrille comprise entre deux stries Z successives. Il mesure environ 2 à 2,5 μm au repos. Il comprend :

Zone	Composition	Comportement lors de la contraction
strie Z	limite du sarcomère, ancrage de l'actine	les stries Z se rapprochent
bande claire I (de part et d'autre de chaque strie Z)	actine seule	raccourcit
bande sombre A (au centre)	myosine, chevauchée par l'actine à ses extrémités	longueur constante
zone H (au centre de la bande A)	myosine seule	raccourcit, peut disparaître

La comparaison de sarcomères relâchés et contractés montre que la bande A garde la même longueur alors que les bandes I et la zone H raccourcissent. Les filaments eux-mêmes ne changent donc pas de longueur : ce sont les filaments d'actine qui **glissent** entre les filaments de myosine, vers le centre du sarcomère, en entraînant les stries Z. C'est le **modèle du glissement des filaments**. Le raccourcissement de chaque sarcomère est petit (quelques dixièmes de micromètre), mais les sarcomères sont placés en série par dizaines de milliers : leurs raccourcissements s'additionnent pour raccourcir le muscle de plusieurs centimètres.

Pour vérifier un modèle sur des mesures, deux relations suffisent, si l'on note S la longueur du sarcomère, A celle de la bande A, I la longueur totale des deux demi-bandes claires d'un sarcomère et H celle de la zone H :

$$S = A + I \quad (I = \text{somme des deux demi-bandes claires})$$

$$\text{longueur d'un filament d'actine} = (S - H) / 2$$

3. Le mécanisme moléculaire : actine, myosine, calcium et ATP

La contraction repose sur la formation de liaisons temporaires entre les têtes de myosine et l'actine, appelées **ponts d'actomyosine**. Chaque tête de myosine effectue un cycle :



Le cycle d'une tête de myosine

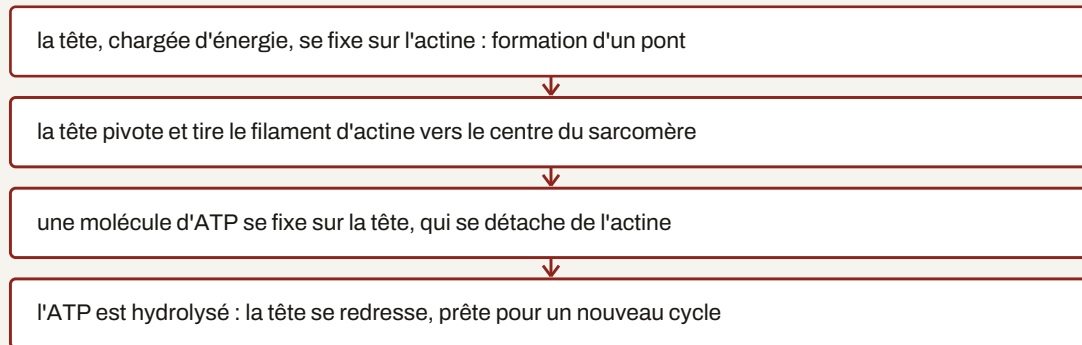
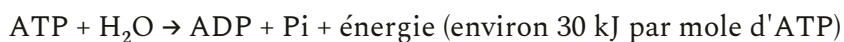


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Chaque cycle fait avancer le filament d'actine d'une dizaine de nanomètres. Des milliers de têtes travaillent de façon asynchrone, ce qui produit un glissement continu.

Le rôle de l'ATP. L'ATP (adénosine triphosphate) est la molécule qui fournit l'énergie de la contraction. Son hydrolyse libère de l'énergie :



où ADP désigne l'adénosine diphosphate et Pi un ion phosphate. L'ATP intervient deux fois dans le cycle : son hydrolyse « arme » la tête de myosine, et sa fixation permet le **détachement** de la tête. Sans ATP, les têtes restent attachées à l'actine et le muscle devient rigide : c'est la **rigidité cadavérique**, qui s'installe quelques heures après la mort, quand l'ATP est épuisé. L'ATP sert aussi à pomper les ions Ca^{2+} vers le réticulum sarcoplasmique pendant le relâchement.

Le rôle du calcium. Au repos, les sites de fixation de la myosine sur l'actine sont masqués par des protéines régulatrices (tropomyosine et troponine) : aucun pont ne se forme, même en présence d'ATP. L'excitation de la fibre déclenche la séquence suivante :

Du message nerveux à la contraction

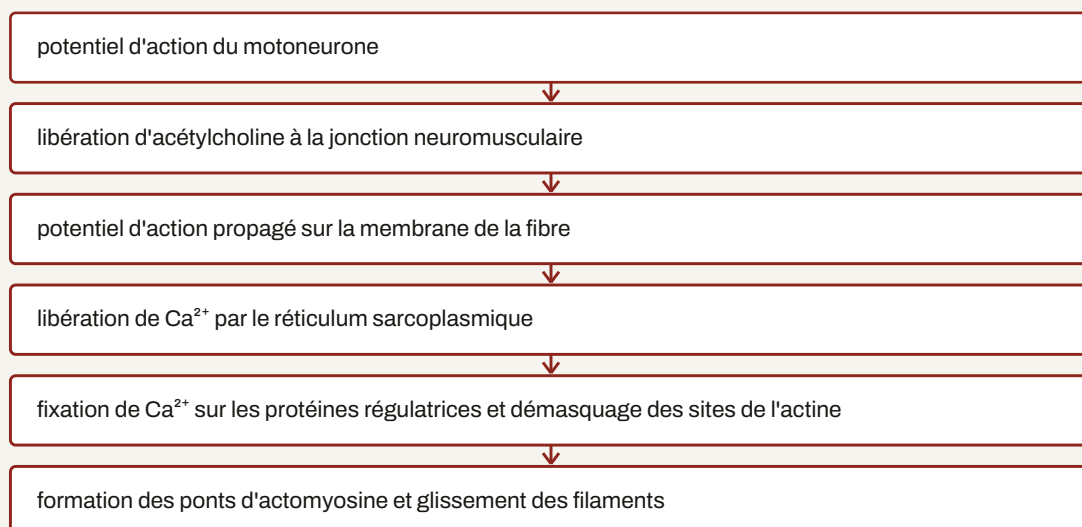


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Lorsque les potentiels d'action cessent, le Ca^{2+} est repompé activement dans le réticulum (avec consommation d'ATP) : les sites de l'actine sont à nouveau masqués, les ponts ne se reforment plus, le muscle se relâche. Le calcium est donc le **signal déclencheur** de la contraction, l'ATP en est la **source d'énergie**.

La contraction musculaire nécessite à la fois des ions Ca^{2+} (qui autorisent la fixation de la myosine sur l'actine) et de l'ATP (qui fournit l'énergie et permet le détachement des têtes de myosine).

4. L'ATP, une molécule à régénérer en permanence

La cellule musculaire contient très peu d'ATP : sa réserve permet seulement quelques secondes de contraction intense. Pourtant, la concentration d'ATP dans un muscle au travail ne chute que très peu. C'est que l'ATP est **régénéré** en permanence à partir d'ADP et de P_i , aussi vite qu'il est consommé :



L'ATP n'est donc pas une réserve d'énergie mais un **intermédiaire** : il transfère l'énergie des molécules organiques (glucose, acides gras) vers les processus qui en consomment (contraction, pompes membranaires, synthèses). Chez l'humain, la quantité d'ATP renouvelée en une journée représente plusieurs dizaines de kilogrammes, alors que l'organisme n'en contient à chaque instant qu'une centaine de grammes environ.

Trois voies métaboliques régénèrent l'ATP dans le muscle :

Voie	Lieu	Dioxygène	Rapidité de mise en route	Durée possible à forte puissance
phosphocréatine	cytoplasme	non	immédiate	quelques secondes
glycolyse et fermentation lactique	cytoplasme	non	très rapide	de quelques dizaines de secondes à environ deux minutes
respiration cellulaire	cytoplasme puis mitochondrie	oui	plus lente (une à deux minutes)	longue, limitée par l'apport de dioxygène et les réserves

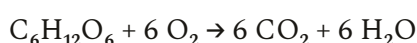
La **phosphocréatine**. Le muscle contient une réserve de **phosphocréatine** (ou créatine phosphate), qui cède directement son groupement phosphate à l'ADP grâce à une enzyme :



Cette réaction est immédiate et ne nécessite pas de dioxygène, mais la réserve s'épuise en quelques secondes d'effort maximal (un sprint court). Elle est reconstituée au repos, grâce à l'ATP produit par la respiration.

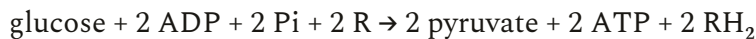
5. La respiration cellulaire et la mitochondrie

La **respiration cellulaire** est l'oxydation complète du glucose en dioxyde de carbone et en eau, en présence de dioxygène. Son équation bilan est :



Elle se déroule en trois étapes.

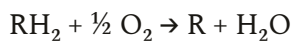
La **glycolyse**, dans le **cytoplasme** (le hyaloplasme). Une molécule de glucose (6 atomes de carbone) est scindée en deux molécules de **pyruvate** (3 atomes de carbone). Cette étape produit 2 ATP et réduit des transporteurs d'électrons, notés R, en RH_2 :



La glycolyse ne consomme pas de dioxygène. Elle est commune à la respiration et aux fermentations.

Le **cycle de Krebs**, dans la **matrice** de la mitochondrie. Le pyruvate entre dans la mitochondrie, où il est complètement oxydé au cours d'une série de réactions (décarboxylations et oxydations) : ses atomes de carbone sont libérés sous forme de CO_2 , et de nombreux transporteurs R sont réduits en RH_2 . Cette étape produit peu d'ATP directement (2 ATP par glucose) : son rôle principal est de produire du CO_2 et des RH_2 .

La **chaîne respiratoire**, dans la **membrane interne** de la mitochondrie, repliée en **crêtes** qui en augmentent la surface. Les RH_2 y sont réoxydés en R ; les électrons cédés sont transférés de protéine en protéine jusqu'au dioxygène, accepteur final, qui est réduit en eau :



L'énergie libérée par ce transfert est utilisée par une enzyme de la membrane interne, l'**ATP synthase**, pour produire la plus grande partie de l'ATP. C'est cette étape qui consomme le dioxygène : sans O_2 , les RH_2 ne sont plus réoxydés, les transporteurs R manquent et le cycle de Krebs s'arrête.

Étape	Localisation	Consomme	Produit
glycolyse	cytoplasme	glucose	2 pyruvate, 2 ATP, 2 RH_2
cycle de Krebs	matrice mitochondriale	pyruvate	CO_2 , RH_2 , un peu d'ATP
chaîne respiratoire	membrane interne (crêtes)	RH_2 , O_2	R, H_2O , beaucoup d'ATP

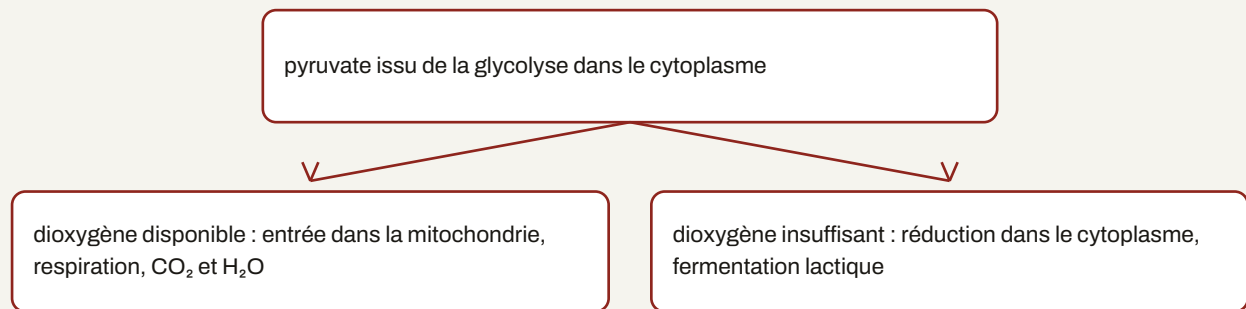
Le bilan de la respiration est d'environ **36 ATP par molécule de glucose** (on retiendra cette valeur conventionnelle ; les estimations récentes la placent plutôt vers 30 à 32). La mitochondrie, organite délimité par deux membranes, est ainsi le siège de la production de l'essentiel de l'ATP des cellules en présence de dioxygène. Une fibre musculaire en contient d'autant plus qu'elle travaille longtemps en aérobie.

Le muscle utilise aussi d'autres molécules que le glucose, notamment les **acides gras**, qui sont oxydés dans la mitochondrie et alimentent eux aussi la chaîne respiratoire. Ils fournissent une part importante de l'énergie lors des efforts prolongés de faible intensité.

6. Les fermentations

Lorsque le dioxygène manque (effort intense où l'apport sanguin ne suit pas) ou dans les cellules qui en sont dépourvues, la glycolyse peut continuer grâce à une **fermentation**. Le problème à résoudre est la réoxydation des RH_2 : sans elle, les transporteurs R s'épuisent et la glycolyse s'arrête. Dans la fermentation, c'est le pyruvate lui-même (ou un dérivé) qui accepte les électrons des RH_2 , dans le cytoplasme.

Le devenir du pyruvate



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

La fermentation lactique (cellules musculaires, certaines bactéries) :



Bilan : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ (acide lactique, présent sous forme de lactate dans la cellule), avec production de **2 ATP par glucose** (ceux de la glycolyse).

La fermentation alcoolique (levures, en absence de dioxygène) : le pyruvate est décarboxylé puis réduit en éthanol.

Bilan : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{CO}_2$, avec production de **2 ATP par glucose**.

Dans les deux cas, l'oxydation du glucose est **incomplète** : une grande partie de son énergie reste dans le lactate ou l'éthanol. Le rendement est donc faible, mais la fermentation présente deux avantages pour le muscle : elle ne dépend pas du dioxygène et elle produit de l'ATP très vite. Le lactate produit passe dans le sang ; il est ensuite en partie oxydé par d'autres cellules (cœur, fibres oxydatives) ou reconverti en glucose par le foie.

Rendement énergétique. L'oxydation complète d'une mole de glucose libère environ 2 860 kJ.

L'hydrolyse d'une mole d'ATP en libère environ 30,5 kJ.

- Respiration : $36 \times 30,5 = 1\,098$ kJ récupérés sous forme d'ATP, soit un rendement d'environ $1\,098 / 2\,860 \approx 38 \%$.
- Fermentation : $2 \times 30,5 = 61$ kJ, soit un rendement d'environ $61 / 2\,860 \approx 2 \%$.

L'énergie non convertie en ATP est dissipée sous forme de chaleur : c'est l'une des origines de l'élévation de la température corporelle pendant un effort.

7. Types de fibres musculaires et adaptation à l'effort

Un muscle contient plusieurs types de fibres, dans des proportions qui varient d'un muscle à l'autre et d'une personne à l'autre :

Caractère	Fibres de type I (lentes)	Fibres de type II (rapides)
vitesse de contraction	lente	rapide
force développée	faible	élevée

Caractère	Fibres de type I (lentes)	Fibres de type II (rapides)
métabolisme dominant	oxydatif (respiration)	glycolytique (fermentation lactique)
mitochondries	nombreuses	peu nombreuses
myoglobine et capillaires	abondants (fibres rouges)	rare (fibres pâles)
réserves de glycogène	modérées	importantes
résistance à la fatigue	grande	faible

Les muscles des coureurs de fond sont riches en fibres de type I, ceux des sprinteurs en fibres de type II. La proportion de départ dépend en partie de facteurs génétiques, mais elle est modifiée par l'entraînement.

Adaptations immédiates à l'effort. Au début d'un effort, la consommation de dioxygène des muscles augmente fortement. L'organisme ajuste en quelques minutes l'apport de O_2 et l'élimination de CO_2 :

- le **débit cardiaque** augmente : $D = FC \times VES$, où FC est la fréquence cardiaque et VES le volume d'éjection systolique (volume de sang éjecté par le ventricule gauche à chaque battement). Il peut passer d'environ $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ au repos à plus de $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$;
- le **débit ventilatoire** augmente : débit = fréquence respiratoire $\times$ volume courant ;
- le sang est **redistribué** : les artérioles des muscles actifs se dilatent, celles des organes digestifs se resserrent ;
- ces ajustements sont commandés par le système nerveux (centres bulbaires, système nerveux autonome), informés par des récepteurs sensibles notamment à la teneur du sang en CO_2 .

La consommation de dioxygène augmente avec la puissance de l'effort jusqu'à un plafond, la **consommation maximale de dioxygène** ($VO_{2\text{max}}$), qui mesure la capacité de l'organisme à fournir de l'énergie par voie aérobie. Au-delà, l'énergie supplémentaire vient de la fermentation lactique, et le lactate s'accumule dans le sang.

Adaptations à l'entraînement.

- L'entraînement en endurance augmente le nombre et la taille des mitochondries, la quantité d'enzymes de la respiration, la teneur en myoglobine et le nombre de capillaires autour des fibres ; le cœur augmente son volume d'éjection systolique, si bien que la fréquence cardiaque de repos diminue ; la $VO_{2\text{max}}$ augmente.
- L'entraînement en force augmente le diamètre des fibres (**hypertrophie**), par synthèse de nouvelles myofibrilles, donc la force maximale.

Ces modifications sont réversibles : elles régressent quand l'activité cesse. Elles illustrent la capacité des cellules musculaires à adapter leur structure et leur métabolisme à leur sollicitation.

Exemples résolus

Exemple 1 : interpréter des mesures de sarcomères

Énoncé. Sur des clichés de microscopie électronique d'une même fibre, on mesure :

État	Sarcomère S	Bande A	Bandes I (total)	Zone H
relâché	2,6 μm	1,6 μm	1,0 μm	0,6 μm
contracté	2,2 μm	1,6 μm	0,6 μm	0,2 μm

Montrer que ces mesures sont en accord avec le modèle du glissement des filaments.

Résolution.

- La bande A, qui correspond à la longueur des filaments de myosine, vaut 1,6 μm dans les deux états : les filaments de myosine ne raccourcissent pas.
- On calcule la longueur des filaments d'actine, $(S - H) / 2$: relâché, $(2,6 - 0,6) / 2 = 1,0 \mu\text{m}$; contracté, $(2,2 - 0,2) / 2 = 1,0 \mu\text{m}$. Les filaments d'actine ne raccourcissent pas non plus.
- Le sarcomère raccourcit de $2,6 - 2,2 = 0,4 \mu\text{m}$. Les bandes I perdent $1,0 - 0,6 = 0,4 \mu\text{m}$ et la zone H perd $0,6 - 0,2 = 0,4 \mu\text{m}$: ces zones, qui mesurent le non-chevauchement des filaments, diminuent exactement du raccourcissement du sarcomère.
- On vérifie la cohérence : $S = A + I$, soit $1,6 + 1,0 = 2,6 \mu\text{m}$ et $1,6 + 0,6 = 2,2 \mu\text{m}$.

Conclusion. Aucun filament ne change de longueur ; c'est leur chevauchement qui augmente. Les filaments d'actine glissent entre les filaments de myosine vers le centre du sarcomère : les mesures valident le modèle du glissement.

Exemple 2 : exploiter une expérience sur des mitochondries isolées

Énoncé. On place une suspension de mitochondries isolées dans un milieu oxygéné et on mesure en continu la concentration en dioxygène du milieu. À $t = 1 \text{ min}$, on ajoute du glucose ; à $t = 3 \text{ min}$, du pyruvate ; à $t = 6 \text{ min}$, du cyanure, poison qui bloque la chaîne respiratoire. Résultats : la concentration en O_2 reste à $250 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de 0 à 3 min ; elle baisse ensuite régulièrement jusqu'à $160 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ à $t = 6 \text{ min}$; elle reste à $160 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ après l'ajout de cyanure.

Résolution.

- De 1 à 3 min, le glucose ne provoque aucune consommation de O_2 : les mitochondries n'utilisent pas le glucose. En effet, la glycolyse, qui transforme le glucose en pyruvate, se déroule dans le cytoplasme, absent de la préparation.
- De 3 à 6 min, le pyruvate déclenche une consommation de O_2 . Vitesse : $(250 - 160) / (6 - 3) = 90 / 3 = 30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Le pyruvate est oxydé dans la matrice (cycle de Krebs), les RH_2 produits sont réoxydés par la chaîne respiratoire, qui réduit le O_2 en eau.
- Après 6 min, le cyanure arrête la consommation de O_2 : c'est bien la chaîne respiratoire qui consomme le dioxygène.

Conclusion. Le substrat de la mitochondrie est le **pyruvate**, et non le glucose ; la consommation de O_2 a lieu au niveau de la **chaîne respiratoire**, ce qui confirme la répartition des étapes entre cytoplasme et

mitochondrie.

Exemple 3 : exploiter des dosages pendant un sprint

Énoncé. Des biopsies du muscle de la cuisse sont réalisées avant et à la fin d'un sprint de 10 s. Les résultats (en mmol par kg de muscle) sont :

Molécule	Avant	Après 10 s
ATP	6,0	5,2
phosphocréatine	20,0	6,0
lactate	1,0	9,0

On estime que, pendant ce sprint, le muscle consomme environ 20 mmol d'ATP par kg. Interpréter.

Résolution.

- L'ATP ne diminue que de $6,0 - 5,2 = 0,8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, alors que la consommation est de $20 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$: la réserve initiale (6,0) n'aurait pas suffi. L'ATP a donc été régénéré pendant l'effort.
- La phosphocréatine baisse de $20,0 - 6,0 = 14,0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. Chaque phosphocréatine régénère un ATP : cette voie a fourni environ 14 mmol d'ATP par kg, soit la majeure partie.
- Le lactate augmente de $9,0 - 1,0 = 8,0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$: la glycolyse suivie de fermentation lactique a fonctionné. Comme elle produit 2 lactate et 2 ATP par glucose, elle a fourni environ 8 mmol d'ATP par kg.
- Bilan : $0,8 + 14 + 8 \approx 23 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, du même ordre que la consommation estimée.

Conclusion. Lors d'un sprint court, l'ATP est régénéré surtout par la **phosphocréatine**, puis par la **fermentation lactique**, deux voies rapides qui ne dépendent pas du dioxygène ; la respiration n'a pas le temps de prendre le relais.

Méthodes et pièges

- Pour décrire la structure d'un muscle, procède toujours du plus grand au plus petit : muscle, faisceau, fibre, myofibrille, sarcomère, filaments. Une fibre est une cellule, une myofibrille n'en est pas une.
- Pour valider le glissement des filaments, montre que la bande A est constante et que les bandes I et la zone H diminuent de la même valeur que le sarcomère.
- Ne dis pas que l'actine ou la myosine « se contractent » : ce sont des filaments qui glissent, leur longueur reste fixe.
- Distingue bien le rôle du calcium (autorisation de la fixation de la myosine sur l'actine) et celui de l'ATP (énergie et détachement). La rigidité cadavérique vient du manque d'ATP, pas d'un excès de calcium.
- Ne confonds pas glycolyse et fermentation : la glycolyse (glucose vers pyruvate) est commune aux deux métabolismes ; la fermentation est la suite, dans le cytoplasme, qui réoxyde les RH_2 .
- Localise correctement : glycolyse dans le cytoplasme, cycle de Krebs dans la matrice, chaîne respiratoire dans la membrane interne. Le dioxygène n'est consommé que par la chaîne respiratoire.

- Dans un calcul de rendement, compare l'énergie stockée dans l'ATP produit à l'énergie totale du glucose, et donne le résultat en pourcentage.
- Ne dis pas que l'ATP est une réserve d'énergie : la réserve est faible, l'ATP est un intermédiaire régénéré en permanence.

Vers le PASS

En PASS, la contraction est reprise pour les trois types de muscles (squelettique, cardiaque, lisse), avec le couplage excitation-contraction détaillé (récepteurs du réticulum, rôle de la troponine C), la relation tension-longueur du sarcomère et la sommation des secousses jusqu'au tétanos. La respiration cellulaire est approfondie en biochimie : réactions du cycle de Krebs, complexes de la chaîne respiratoire, gradient de protons, bilan précis en ATP, régulation par le rapport ATP sur ADP. Ces notions servent ensuite en physiologie de l'effort et pour comprendre certaines pathologies mitochondriales et musculaires.

Suite en PASS : Physiologie des trois types musculaires

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Légende un sarcomère en précisant, pour chaque zone, les filaments qu'elle contient : strie Z, bande claire I, bande sombre A, zone H. Indique ensuite quelles zones raccourcissent lors de la contraction.
2. Une myofibrille de 5,0 cm de long est formée de sarcomères de 2,5 μm placés bout à bout. a) Calcule le nombre de sarcomères. b) Lors d'une contraction, chaque sarcomère mesure 2,1 μm . Calcule la nouvelle longueur de la myofibrille et son raccourcissement en pourcentage.
3. a) Écris l'équation bilan de la respiration cellulaire du glucose. b) Écris l'équation bilan de la fermentation lactique et celle de la fermentation alcoolique. c) Indique le nombre d'ATP produits par molécule de glucose dans chaque cas.
4. Classe chaque caractéristique dans la colonne des fibres de type I ou de type II : nombreuses mitochondries ; contraction rapide ; riches en myoglobine ; fatigue rapide ; métabolisme glycolytique ; nombreux capillaires ; force élevée ; utilisées dans les efforts d'endurance.
5. Remets dans l'ordre les événements qui mènent à la contraction : fixation de Ca^{2+} sur les protéines régulatrices de l'actine ; potentiel d'action sur la membrane de la fibre ; formation des ponts d'actomyosine ; libération d'acétylcholine ; libération de Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique ; glissement des filaments d'actine.

Niveau 2 : type bac

6. On mesure des sarcomères d'une fibre de grenouille dans deux états.

État	Sarcomère	Bande A	Bandes I (total)	Zone H
relâché	2,4 μm	1,6 μm	0,8 μm	0,4 μm
contracté	2,0 μm	1,6 μm	0,4 μm	0 μm

a) Calcule la longueur des filaments d'actine dans chaque état et conclus. b) Explique pourquoi la zone H a disparu dans l'état contracté. c) Une myofibrille compte 10 000 sarcomères en série. Calcule son raccourcissement en millimètres.

7. On cultive des levures dans une enceinte fermée contenant une solution de glucose et munie de sondes mesurant le dioxygène, le dioxyde de carbone et l'éthanol. De 0 à 10 min, la teneur en O_2 diminue jusqu'à zéro, la teneur en CO_2 augmente et aucun éthanol n'apparaît. Après 10 min, la teneur en O_2 reste nulle, la teneur en CO_2 continue d'augmenter et de l'éthanol apparaît.

a) Identifie le métabolisme des levures dans chaque phase. Justifie. b) Écris l'équation bilan correspondant à chaque phase. c) Dans la deuxième phase, la consommation de glucose par les levures augmente fortement. Explique pourquoi.

8. On utilise des fibres musculaires « glycinées » : leurs membranes sont rendues perméables, si bien que le milieu extérieur entre en contact direct avec les myofibrilles. On teste différents milieux :

- milieu A : ATP et Ca^{2+} : la fibre se contracte ;
- milieu B : ATP sans Ca^{2+} : la fibre reste relâchée et souple ;
- milieu C : Ca^{2+} sans ATP : la fibre ne se contracte pas et devient rigide ;
- milieu D : fibre contractée en milieu A, puis transférée dans un milieu riche en ATP privé de Ca^{2+} : la fibre se relâche.

a) Que montrent les milieux A et B sur le rôle du calcium ? b) Explique la rigidité observée en C. c) Explique le résultat D. d) Relie le résultat C à la rigidité cadavérique.

9. On mesure chez un sujet entraîné les paramètres suivants :

Paramètre	Repos	Effort intense
fréquence cardiaque (battements·min ⁻¹)	65	170
volume d'éjection systolique (mL)	75	115
fréquence respiratoire (cycles·min ⁻¹)	12	40
volume courant (L)	0,5	2,5

a) Calcule le débit cardiaque au repos et à l'effort, en L·min⁻¹, et le facteur d'augmentation. b) Calcule le débit ventilatoire au repos et à l'effort. c) Explique en quoi ces modifications répondent aux besoins des muscles.

Niveau 3 : vers le PASS

10. L'oxydation complète d'une mole de glucose libère 2 860 kJ ; l'hydrolyse d'une mole d'ATP libère 30,5 kJ. On retient 36 ATP par glucose pour la respiration et 2 ATP pour la fermentation. a) Calcule le rendement énergétique de chaque voie. b) Que devient l'énergie non récupérée sous forme d'ATP ? c) Explique pourquoi l'énergie libérée par la fermentation est si faible alors que la glycolyse a bien eu lieu.

11. QCM. Indique la ou les propositions exactes et justifie chacune.

A. Lors de la contraction, la bande A raccourcit. B. En l'absence d'ATP, les têtes de myosine restent fixées à l'actine. C. Le dioxygène est consommé lors du cycle de Krebs. D. Le pyruvate est produit dans le cytoplasme. E. La phosphocréatine permet de régénérer l'ATP sans dioxygène. F. Le Ca^{2+} fournit l'énergie nécessaire au pivotement des têtes de myosine.

12. Un muscle doit régénérer 3,6 mol d'ATP au cours d'un effort. La masse molaire du glucose est de $180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. a) Calcule la masse de glucose nécessaire si tout l'ATP provient de la respiration (36 ATP par glucose). b) Même question si tout provient de la fermentation lactique. c) Compare et explique pourquoi un effort intense et prolongé en fermentation épuise vite les réserves de glycogène.

13. On mesure, chez des volontaires, avant et après six mois d'entraînement en endurance, la part du volume des fibres occupée par les mitochondries, le nombre de capillaires par fibre et la VO_2max .

Paramètre	Avant	Après
volume mitochondrial (% du volume de la fibre)	4,0	6,0
capillaires par fibre	1,5	2,0
VO_2max ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	45	52

a) Calcule l'augmentation relative de chaque paramètre en pourcentage. b) Explique comment chaque modification augmente la capacité du muscle à produire de l'ATP par voie aérobie. c) Prévois l'évolution de la concentration sanguine de lactate pour un même effort sous-maximal avant et après l'entraînement. Justifie.

Corrigés

1. La **strie Z** limite le sarcomère et sert d'ancrage aux filaments d'actine. La **bande claire I**, de part et d'autre de chaque strie Z, ne contient que de l'actine. La **bande sombre A**, au centre, contient la myosine, chevauchée par l'actine à ses deux extrémités. La **zone H**, au centre de la bande A, ne contient que de la myosine. Lors de la contraction, **les bandes I et la zone H raccourcissent**, la bande A garde sa longueur et les stries Z se rapprochent.

2. a) Conversion : $5,0 \text{ cm} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ m}$; $2,5 \mu\text{m} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$. Nombre : $5,0 \times 10^{-2} / 2,5 \times 10^{-6} = 20\,000$ **sarcomères**. b) Nouvelle longueur : $20\,000 \times 2,1 \mu\text{m} = 42\,000 \mu\text{m} = 4,2 \text{ cm}$. Raccourcissement : $5,0 - 4,2 = 0,8 \text{ cm}$, soit $0,8 / 5,0 = 0,16$, donc **16 %**, identique au raccourcissement relatif de chaque sarcomère ($0,4 / 2,5 = 16 \%$).

3. a) Respiration : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$. b) Fermentation lactique : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3$; fermentation alcoolique : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{ CO}_2$. c) Respiration : **environ 36 ATP** par glucose ; chaque fermentation : **2 ATP** par glucose, ceux de la glycolyse.

4. Type I : nombreuses mitochondries ; riches en myoglobine ; nombreux capillaires ; utilisées dans les efforts d'endurance. Type II : contraction rapide ; fatigue rapide ; métabolisme glycolytique ; force élevée. **Type I = oxydatives et endurantes ; type II = glycolytiques, rapides et fatigables.**

5. Ordre : libération d'acétylcholine ; potentiel d'action sur la membrane de la fibre ; libération de Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique ; fixation de Ca^{2+} sur les protéines régulatrices de l'actine ; formation des ponts d'actomyosine ; glissement des filaments d'actine. **Acétylcholine, PA**

musculaire, libération de Ca^{2+} , démasquage de l'actine, ponts, glissement.

6. a) Longueur de l'actine = $(S - H) / 2$. Relâché : $(2,4 - 0,4) / 2 = 1,0 \mu\text{m}$. Contracté : $(2,0 - 0) / 2 = 1,0 \mu\text{m}$. La bande A (myosine) reste à $1,6 \mu\text{m}$. **Aucun filament ne change de longueur : les filaments glissent les uns par rapport aux autres.** b) La zone H correspond à la partie de la myosine non chevauchée par l'actine. Dans l'état contracté, les extrémités des filaments d'actine des deux moitiés du sarcomère se rejoignent au centre ($2 \times 1,0 = 2,0 \mu\text{m} = S$) : **il n'y a plus de zone de myosine seule, la zone H disparaît.** c) Raccourcissement par sarcomère : $2,4 - 2,0 = 0,4 \mu\text{m}$. Pour 10 000 sarcomères : $10\,000 \times 0,4 = 4\,000 \mu\text{m} = 4 \text{ mm}$.
7. a) De 0 à 10 min, les levures consomment du O_2 et rejettent du CO_2 sans produire d'éthanol : c'est la **respiration**. Après 10 min, en absence de O_2 , elles rejettent du CO_2 et produisent de l'éthanol : c'est la **fermentation alcoolique**. b) Phase 1 : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$. Phase 2 : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{CO}_2$. c) La fermentation ne produit que 2 ATP par glucose contre environ 36 pour la respiration. Pour obtenir la même quantité d'ATP, les levures doivent dégrader **environ 18 fois plus de glucose** ($36 / 2 = 18$), d'où l'augmentation de leur consommation.
8. a) Avec de l'ATP, la fibre ne se contracte qu'en présence de Ca^{2+} : **le calcium est indispensable au déclenchement de la contraction** ; il permet la fixation des têtes de myosine sur l'actine en démasquant ses sites. b) En C, le Ca^{2+} démasque les sites de l'actine, les têtes de myosine s'y fixent mais, sans ATP, elles ne peuvent ni effectuer de cycle complet ni se détacher : **les ponts restent figés**, la fibre est rigide. c) En D, l'ATP permet le détachement des têtes, et en absence de Ca^{2+} les sites de l'actine sont à nouveau masqués : les ponts ne se reforment pas, **la fibre se relâche**. d) Après la mort, l'ATP n'est plus produit ; le Ca^{2+} fuit dans le cytoplasme, les têtes de myosine se fixent à l'actine sans pouvoir s'en détacher : c'est la **rigidité cadavérique**, l'équivalent du milieu C.
9. a) Débit cardiaque $D = \text{FC} \times \text{VES}$. Repos : $65 \times 75 = 4\,875 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \approx 4,9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Effort : $170 \times 115 = 19\,550 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \approx 19,6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Facteur : $19\,550 / 4\,875 \approx 4,0$. b) Débit ventilatoire = fréquence $\times$ volume courant. Repos : $12 \times 0,5 = 6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Effort : $40 \times 2,5 = 100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, soit environ 17 fois plus. c) À l'effort, les muscles consomment beaucoup plus de dioxygène pour régénérer l'ATP par la respiration et produisent plus de CO_2 . L'augmentation du débit ventilatoire accroît l'entrée de O_2 dans le sang et la sortie de CO_2 ; l'augmentation du débit cardiaque accroît le transport de O_2 vers les muscles et du CO_2 vers les poumons. **Ces ajustements adaptent l'apport de O_2 et l'élimination du CO_2 à l'activité musculaire.**
10. a) Respiration : $36 \times 30,5 = 1\,098 \text{ kJ}$; rendement = $1\,098 / 2\,860 \approx 0,384$, soit **environ 38 %**. Fermentation : $2 \times 30,5 = 61 \text{ kJ}$; rendement = $61 / 2\,860 \approx 0,021$, soit **environ 2 %**. b) L'énergie non récupérée est **dissipée sous forme de chaleur**, ce qui contribue à l'élévation de la température du corps pendant l'effort. c) Dans la fermentation, l'oxydation du glucose est incomplète : elle s'arrête au pyruvate, réduit ensuite en lactate (ou en éthanol). **L'essentiel de l'énergie du glucose reste contenue dans ces molécules organiques**, qui ne sont pas oxydées en CO_2 .

11. A : **fausse**, la bande A correspond aux filaments de myosine, dont la longueur est constante. B : **exacte**, l'ATP est nécessaire au détachement des têtes : sans ATP, elles restent fixées (rigidité). C : **fausse**, le cycle de Krebs produit du CO_2 et des RH_2 mais ne consomme pas de O_2 ; c'est la chaîne respiratoire qui le consomme. D : **exacte**, le pyruvate est produit par la glycolyse, dans le cytoplasme. E : **exacte**, la phosphocréatine cède son phosphate à l'ADP sans intervention du dioxygène. F : **fausse**, l'énergie provient de l'hydrolyse de l'ATP ; le Ca^{2+} est un signal qui démasque les sites de l'actine. **Réponses exactes : B, D, E.**
12. a) Respiration : $n(\text{glucose}) = 3,6 / 36 = 0,10 \text{ mol}$; $m = 0,10 \times 180 = 18 \text{ g}$. b) Fermentation : $n(\text{glucose}) = 3,6 / 2 = 1,8 \text{ mol}$; $m = 1,8 \times 180 = 324 \text{ g}$. c) La fermentation consomme **18 fois plus de glucose** pour la même quantité d'ATP ($324 / 18 = 18$). Lors d'un effort intense prolongé où la fermentation domine, le glycogène musculaire, qui fournit ce glucose, est donc consommé très rapidement, ce qui contribue à limiter la durée de l'effort.
13. a) Volume mitochondrial : $(6,0 - 4,0) / 4,0 = 0,50$, soit **+50 %**. Capillaires : $(2,0 - 1,5) / 1,5 \approx 0,33$, soit **+33 %**. $\text{VO}_{2\text{max}}$: $(52 - 45) / 45 \approx 0,156$, soit **+16 %**. b) Plus de mitochondries : plus de sites où se déroulent le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire, donc plus d'ATP produit par voie aérobie. Plus de capillaires : meilleur apport de O_2 et de nutriments aux fibres et meilleure évacuation du CO_2 . Ces deux adaptations, avec celles du cœur, augmentent la quantité maximale de O_2 que l'organisme peut utiliser, d'où la hausse de la $\text{VO}_{2\text{max}}$. c) Après l'entraînement, pour un même effort, une plus grande part de l'ATP est produite par la respiration ; le pyruvate est davantage oxydé dans les mitochondries et moins réduit en lactate. **La concentration sanguine de lactate sera plus faible** pour le même effort.