

Les cellules musculaires : diversité structurale et fonctionnelle

Eléments de correction

INTRODUCTION

(*accroche*) Lors d'un effort physique, les muscles d'un sportif augmentent leur épaisseur ; parallèlement, le cœur accroît sa fréquence de battements, en même temps que le diamètre de certaines artères, contrôlées par des muscles, augmente.

(*définition*) Les cellules musculaires sont des cellules animales capables de se contracter, c'est-à-dire de produire un mouvement de raccourcissement. Il existe dans l'organisme plusieurs types de cellules musculaires, mises en jeu au cours l'effort physique : les cellules musculaires striées squelettiques (CMSS, liées au squelette) et cardiaques (CMSC, dans le cœur exclusivement), et les cellules musculaires lisses (dans la paroi des vaisseaux sanguins).

(*problématique*) Quelle est la diversité structurale de ces trois types de cellules musculaires ? Quelle est leur fonction, et en quoi cette diversité structurale est-elle responsable de la diversité de leurs fonctions ?

(*démarche*) On verra d'abord que ces cellules possèdent des protéines diverses (cytosquelette et protéines membranaires, en particulier) leur permettant de se contracter au prix d'une dépense énergétique sous forme d'ATP. On verra ensuite d'une part que l'ATP nécessaire à la contraction est produit par le catabolisme oxydatif, et d'autre part que cette contraction est particulièrement contrôlée par l'organisme, selon des modalités différentes selon le type de cellule musculaire considéré. Enfin, on verra en quoi la diversité structurale et fonctionnelle des cellules musculaires est adaptée à leur rôle respectif au sein de des organes et de l'organisme.

I. Des structures adaptées à la contraction

1. Les cellules musculaires striées et l'organisation en sarcomère

- Observation : striation (microscope optique ou électronique)
- Schéma :
 - structure d'une CMSS (dont mitochondries, tubule T, RE sarcoplasmique)
 - structure d'un sarcomère (dont actine, myosine, troponine, tropomyosine)

2. Interaction actine-myosine, calcium et contraction musculaire

- a) Fixation du calcium sur la troponine
- Schéma : fixation de Ca^{2+} sur la troponine, décalage et libération du site d'interaction actine-myosine
- b) Interaction actine-myosine et mécanisme de la contraction
- Evoquer la rigidité cadavérique
- Schéma : cycle de contraction, fixation de l'ATP sur la myosine, changement de conformation
- c) L'ATP est une monnaie énergétique pour le muscle
- Notions : énergie chimique, couplage chimio-mécanique

II. Le métabolisme hétérotrophe du muscle produit l'ATP nécessaire à la contraction

1. Catabolisme oxydatif et production d'ATP

- a) Oxydation totale de matière organique et production d'ATP et de coenzymes réduits
- Notions : oxydation totale, production de CO_2 , production de coenzymes réduits
- Schéma : bilan de la glycolyse, du cycle de Krebs
- b) La fermentation : une production d'ATP à faible rendement dans des conditions d'anoxie transitoire
- Notions : production d'ATP pendant les premiers instants de l'effort, avant que l'apport d' O_2 ne soit suffisant.
- Schéma : bilan de la fermentation lactique

2. Chaîne mitochondriale et production d'ATP

- Schéma : mitochondrie, et chaîne de transport d'électrons associées à un gradient de H^+ et à une production d'ATP
- a) Réoxydation des coenzymes réduits par l' O_2 dans la chaîne respiratoire
- b) Création d'un gradient de H^+ par couplage chimio-osmotique
- c) Production d'ATP par l'ATP-synthase par couplage osmo-chimique

3. **Nutrition du muscle par le système circulatoire**
 - a) Apports sanguins de molécules organiques et d'O₂ pour le catabolisme
- Notions : transport de glucose, de lipides, d'AαA par le sang, transport d'O₂ par l'hémoglobine et les hématies
 - b) Evacuation par le sang des déchets du catabolisme
- Notions : transport de l'urée par le sang, et du CO₂ par les hématies

III. Activité électrique et contraction musculaire

1. **Dépolarisation, calcium et contraction musculaire**
 - a) Une dépolarisation provoque l'entrée de Ca²⁺ dans le muscle
 - Notions : potentiel de membrane, de repos, canal voltage dépendant, canal à la ryanodine, tubule T
 - Schéma : dépolarisation et activation des canaux à Ca²⁺ voltage dépendant (mb plasmique) et à ryanodine (RE sarcoplasmique)
 - b) L'automatisme cardiaque et la dépolarisation spontanée des cellules cardiaques
 - Notions : un cœur transplanté continue à battre ; nœud sinusal et tissu nodal, canal HCN, PA du nœud sinusal, expliqué par les trois types de canaux.
 - Schémas : PA du nœud sinusal
2. **Contrôle nerveux et hormonal de la contraction**
 - a) La synapse neuromusculaire et la contraction de la CMSS
 - Notions : signal nerveux et exocytose de vésicules d'Ach, transformation signal électrique → chimique, récepteur nicotinique (ionotrope), dépolarisation
 - Schémas : transmission synaptique au niveau de la jonction neuromusculaire
 - b) Le contrôle nerveux et hormonal du myocarde
 - Notions : mise en évidence du baroréflexe, innervation sympathique et parasympathique, récepteur muscarinique (métabotrope) et son mode d'action, récepteur β₁ adrénergique et son mode d'action, sensibilité à l'Adr (hormone) comme à la Nad (neurotransmetteur)
 - Schémas :
 - mode d'action d'un des deux récepteurs
 - décalage vers la droite ou vers la gauche du PA en fonction du neurotransmetteur (Ach ou Nad)
 - anatomie fonctionnelle de l'innervation du sinus carotidien et du cœur
 - c) Le contrôle nerveux et hormonal des muscles lisses de la paroi des artérioles
 - Notions : présence de CML dans la média, diversité des récepteurs adrénergiques selon type d'artériole
 - Schémas :
 - (ici ou ailleurs) : contrôle par Nad et Adr de la vasomotricité des différents types d'artérioles
 - structure de la paroi d'une artériole

IV. La diversité structurale des cellules musculaires explique la diversité de leurs rôles

1. **Le muscle squelettique et les déplacements de l'organisme permis par la CMSS**
 - Notion : la CMSS est adaptée aux déplacements de l'organisme, liaison à des os par les tendons, innervation et commande volontaire.
 - Schémas : articulation et muscle la mettant en mouvement
2. **La mise en circulation du sang et la CMSC**
 - a) Le cœur, un muscle creux mettant en circulation le sang
 - Notions : muscle creux, deux cavités, quatre valves, diastole et systole, circulation unidirectionnelle
 - Schémas : anatomie fonctionnelle du cœur
 - b) Le cœur, un muscle transmettant de l'énergie mécanique au cœur
 - Notion : travail cardiaque
 - Schéma : lien entre cycle cardiaque et travail cardiaques
 - c) Le cœur, un organe à forte cohésion mécanique grâce à des jonctions adhérentes
 - Notion : desmosomes, forte cohésion des cellules
 - Schémas : desmosomes entre les cellules, structure d'un desmosome

- d) Le cœur, un organe assurant une contraction coordonnée des systoles atriales et ventriculaires
- Notion : systoles synchrones, grâce à des jonctions gap.
- Schémas : jonction gap, anneau fibreux (dans le schéma de structure du cœur)

3. La vasomotricité lors de l'effort et la CML

- Notions : modifications physiologiques à l'effort, augmentation et redistribution du débit sanguin, contrôle nerveux et hormonal, contrôle local
- Schéma :
 - (ici ou ailleurs) : contrôle par Nad et Adr de la vasomotricité des différents types d'artérioles
 - contrôle par le NO, le pH, la P_{CO_2}

CONCLUSION

(bilan du I) Les cellules musculaires sont très riches en actine et en myosine, fibres du cytosquelette, qui sont d'ailleurs particulièrement structurées dans le cas des muscles striés, sous forme de sarcomères. Grâce à un influx calcique, l'actine et la myosine entrent en interaction se déplacent relativement par l'utilisation de l'énergie chimique de l'ATP, ce qui provoque la contraction musculaire.

(bilan du II) Le catabolisme oxydatif, qui a lieu dans le cytosol et la mitochondrie, consiste en la récupération de l'énergie chimique des nutriments (molécules organiques) par une oxydation totale par le dioxygène. Cette énergie est convertie en ATP. Dans certains cas, les muscles peuvent produire de l'ATP par fermentation, si l' O_2 n'est pas assez abondant.

(bilan du III) La contraction est la conséquence d'une activité électrique, c'est-à-dire d'une dépolarisation de la membrane de la cellule. Elle peut être totalement spontanée, comme chez le muscle cardiaque, où elle explique l'automatisme remarquable du cœur. Chez les autres types de muscles, elle peut être provoquée par la communication nerveuse ou hormonale. L'acétylcholine et la noradrénaline sont alors les deux neurotransmetteurs les plus importants dans cette régulation.

(bilan du IV)

- Les muscles striés squelettiques, à commande volontaire, permettent, par leurs liens anatomiques avec le cerveau (par les motoneurons) et les os (via les tendons) la mise en mouvement du squelette, et par là même une des principales fonctions de relation : la locomotion.
- Les muscles striés cardiaques ont pour rôle la transmission au sang d'une énergie mécanique, sous la forme de la pression artérielle, responsable du débit sanguin. Cela est permis par l'anatomie originale du cœur, un muscle creux avec 4 valves anti-reflux, et possédant des jonctions gap responsables d'une contraction diachronique des atriums d'une part, et des ventricules d'autre part.
- Les muscles lisses des vaisseaux sont responsables de la modulation du débit alloué à chaque organe lors de l'effort physique, grâce à un contrôle fin de nature hormonale, nerveuse et locale.

(bilan général) Les cellules musculaires, par leur diversité structurale, sont donc bien responsables de rôles très différents au sein de l'organisme. Chacun des rôles (locomotion, mise en circulation, modulation de la perfusion des organes) est vital pour l'organisme animal.

(ouverture I) Les cellules musculaires ont bien d'autres rôles que ceux présentés ici, qui sont les principaux. On pourra citer la ventilation, la parturition (utérus), l'horripilation, l'éjection de lait par les glandes mammaires, la progression du bol alimentaire ou la variation du diamètre pupillaire. En somme, une grande partie des mouvements de l'organisme est réalisée par des cellules musculaires.

(ouverture II) Comme pour tout processus particulièrement important pour la survie de l'organisme, il existe des dysfonctionnements graves liés aux muscles squelettiques :

- Des maladies infectieuses, comme le tétanos, causé par la bactérie *Clostridium tetani*. La toxine tétanique provoque une contraction généralisée, extrêmement douloureuse et parfois mortelle, des muscles squelettiques
- Des maladies génétiques : la myopathie de Duchenne, qui provoque une atrophie dégénérative des muscles striés squelettiques, est une maladie mortelle due à la mutation délétère à l'état homozygote du gène de la dystrophine, impliqué dans la structure du muscle squelettique.
- Des toxines : le curare, un inhibiteur compétitif de l'acétylcholine, empêche la contraction musculaire en bloquant la jonction neuromusculaire. Il est utilisé pour tuer des proies par des peuples autochtones d'Amazonie, qui en enduisent leurs flèches.

(ouverture III) Les unicellulaires ne possèdent pas de cellules musculaires, qui sont par ailleurs une synapomorphie des Eumétazoaires, tous pluricellulaires. Pour autant, des mouvements existent à l'échelle cellulaire : l'interaction actine-myosine et leur mouvement relatif par consommation d'ATP existe chez tous les Eucaryotes, et c'est à partir de ce bagage cellulaire existant qu'est apparue au cours de l'évolution la cellule musculaire.

(ouverture IV) Les plantes sont souvent bien moins mobiles que les animaux ; pour autant, des mouvements existent chez ces organismes, et ils peuvent même être rapides (comme le piège carnivore de la Dionée, ou les feuilles sensibles au toucher de la Sensitive). Ils sont expliqués par des mouvements d'eau rapides, faisant varier la turgescence des vacuoles. Des fonctions identiques à celles des animaux sont donc ici remplies par des structures très différentes, et ces fonctions sont donc convergentes.

Quelques mots sur les copies...

Démarche

- D'une façon générale, je note beaucoup de progrès dans la construction des introductions. Attention cependant, si vous faites une accroche (avec une maladie musculaire, par exemple) à bien **utiliser** cette accroche.
- Les conclusions doivent encore être développées : elles se limitent trop souvent à « les cellules musculaires sont diverses » sans préciser de quelle diversité on parle. La conclusion doit absolument **apporter des réponses claires et précises**. Exemple : « il existe 3 types de cellules musculaires : les CMS squelettiques, qui mettent en mouvement l'organisme, les CMS cardiaques, responsables de la circulation, et les CML, responsables du contrôle du flux sanguin dans l'organisme. »
- Les plans manquent parfois de détails... il ne faut pas hésiter à détailler le plan, pour éviter de traiter dans un énorme paragraphe de 3 pages, par exemple, tout le fonctionnement du cœur... alors qu'on pourrait parler de l'anatomie (valves, cavités), de l'électrophysiologie (fonctionnement du nœud sinusal et canaux ioniques), de la régulation (par innervation sympathique et parasympathique...)
- La construction des paragraphes s'améliore aussi ! Attention cependant à quelques points :
 - N'en faites pas trop ! une mise en évidence est suffisante, inutile d'en mettre 2 pour le même concept.
 - C'est bien de poser des questions, mais il faut qu'elles soient sincères, sinon ça en devient mécanique et un peu lourd.
 - Attention aux fausses expériences inventées de toute pièce : on n'a pas mis en évidence la présence d'actine dans le muscle par « gène rapporteur, » par exemple. Ne donnez que les expériences que vous connaissez vraiment.

Concepts

- Un point est particulièrement loupé dans le devoir : la structure du sarcomère, le Ca^{2+} et l'ATP dans la mise en mouvement de ce sarcomère. A revoir en détail : c'est très classique, et nouveau au programme : il y a des chances que ça tombe au concours !
- Je rappelle que le muscle cardiaque **est strié**, et que cette striation est **due à son organisation en sarcomères**, comme pour la CMSS.
- Le potentiel d'action cardiaque a été trop rarement présenté et développé.
- Une cellule **excitable** est une cellule qui peut se dépolariser, indépendamment du fait qu'elle puisse se contracter ou non. Donc, les cellules musculaires sont excitables, mais les cellules nerveuses aussi !
- Réflexe, autonome, automatique : ce sont des mots différents.
 - Un processus est **automatique** lorsqu'il se produit sans intervention extérieure (ex : le rythme cardiaque).
 - Un **réflexe** est une réponse non consciente et non volontaire à un processus, mais qui n'est donc pas automatique (exemple : vasodilatation des artérioles pendant l'effort).
 - Les réflexes font intervenir le système nerveux **autonome**, c'est-à-dire non volontaire.

De façon anecdotique...

- La fermentation, dans le muscle, n'est **que** lactique. Si elle était alcoolique, il faudrait se faire du souci pour la santé des sportifs, qui auraient sans doute une alcoolémie très peu compatible avec leur activité...

Et le prochain devoir... ? Mardi 25 avril prochain, c'est l'épreuve de synthèse qui ouvre le bal du concours Agro-Véto de 8h30 à 11h30. Faites-vous une petite liste des grosses erreurs à éviter, qui vous sont propres. Et surtout, battez vous jusqu'à bout et croyez en vos capacités !

Bon courage !