Zeitschrift: Jugend und Sport : Fachzeitschrift für Leibesübungen der Eidgenössischen Turn- und Sportschule Magglingen

Herausgeber: Eidgenössische Turn- und Sportschule Magglingen

Band: 29 (1972)

Heft: 5

Artikel: Fondements anatomiques, physiologiques et biochimiques de la contraction musculaire

Autor: Howald, H. / Moesch, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-994759

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Fondements anatomiques, physiologiques et biochimiques de la contraction musculaire

H. Howald et H. Moesch

1. Aspect anatomique

Lorsque l'on examine un muscle au microscope, on remarque toujours une subdivision de ce muscle en une multitude de fibres musculaires. Une fibre musculaire seule est en fait *la* cellule musculaire proprement dite. Cette cellule peut avoir une longueur de plusieurs centimètres et contenir plusieurs noyaux, alignés le long de sa paroi.

Avec un microscope ordinaire, on voit encore une particularité supplémentaire dans le muscle squelettique: la présence d'une striation transversale bien caractéristique. La nature de cette striation ne peut être expliquée qu'à l'aide du microscope électronique, qui permet des grossissements encore beaucoup plus élevés.

En agrandissant donc notre objet d'environ 20000 fois, on distingue à l'intérieur de la cellule musculaire des structures filiformes, auxquelles on a donné le nom de fibrilles. Ces fibrilles se composent à leur tour d'un assemblage de deux protéines spéciales: l'actine et la myosine. Ces deux sortes de molécules ne se trouvent que dans la cellule musculaire. Le polymère de la molécule d'actine se présente sous forme de «fils» qui sont emboîtés entre les fils de myosine, un peu plus épais. Cette interconnection est représentée dans les fig. 1 et fig. 2.

Cette structure se répète le long de la fibre musculaire par «compartiments» ayant une longueur d'environ 2–3 millièmes de millimètre. Ces compartiments portent le nom de sarcomères. Lors de la contraction musculaire, lorsque le muscle se raccourcit activement, il se fait une liaison chimique momentanée entre les fils d'actine et de myosine. Il en résulte un déplacement des molécules d'actine par rapport à celles de myosine. Les parois des «compartiments du muscle», des sarcomères, se rapprochent. Le sarcomère se raccourcit. Par addition, le résultat global du processus sera un raccourcissement de la fibre musculaire entière (fig. 2).

2. Aspect physiologique

Pour que la réaction décrite entres les fibres d'actine et de myosine puisse avoir lieu, deux conditions sont indispensables:

- les fibrilles musculaires doivent être entourées par un milieu contenant une concentration bien précise en ions calcium (Ca^{+2})
- comme fournisseur d'énergie, de l'ATP doit être présent (ATP = adénosine-triphosphate)

Chaque contraction est déclenchée par une impulsion électrique, transmise par le nerf. Le signal électrique provenant du nerf traverse la membrane de la cellule musculaire par un réseau de canalicules extrêmement fins. Cette impulsion électrique provoque la libération d'ions calcium dans le liquide cellulaire, à partir de ces canalicules. Au même moment, il y a contraction. Immédiatement après la fin de la stimulation nerveuse, les ions calcium sont pompés à nouveau dans les canalicules et le muscle se détend (fig. 2).

L'adénosine-triphosphate (ATP) est une substance chimique qui joue un rôle considérable dans la plupart des processus vitaux, parce qu'elle fait office de fournisseur d'énergie. On peut comparer l'ATP à un accumulateur.

Par clivage et libération d'une molécule de phosphate (Pi), cet accumulateur fournit l'énergie chimique nécessaire à la réaction entre l'actine et la myosine.

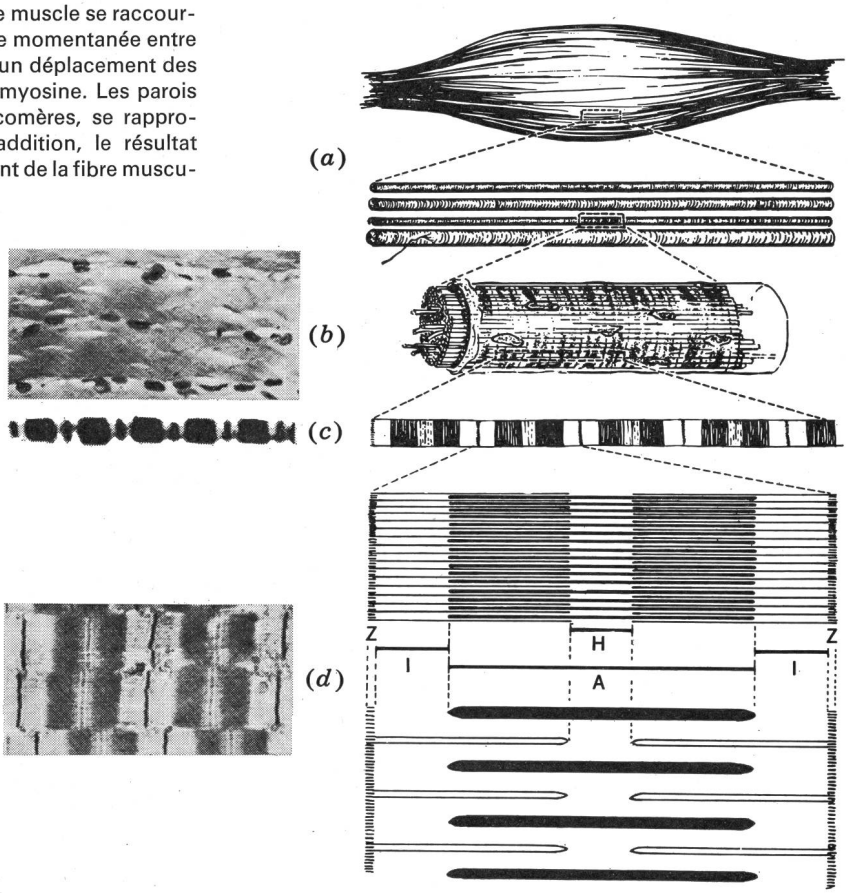

Fig. 1:
Structure du muscle squelettique:
Dans la partie gauche, images vues au microscope optique (b, c) et électronique (d)
Dans la partie droite, représentation schématique correspondante

a) muscle en entier
b) groupe de fibres musculaires
c) fibre musculaire isolée
d) fibrilles musculaires vues au microscope électronique
Le sarcomère est l'espace délimité par deux bandes Z

(selon Astrand et Rodahl)

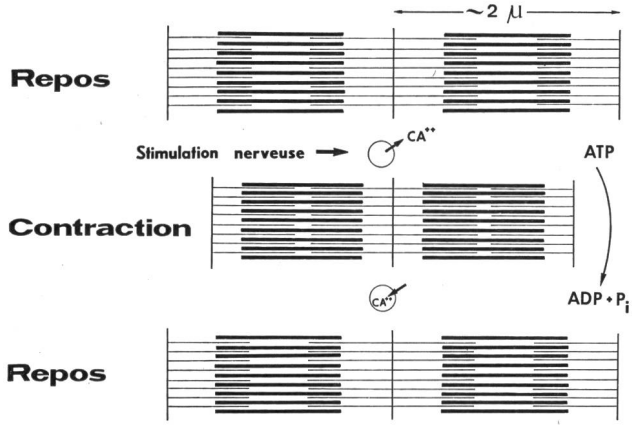

Fig. 2:
Représentation schématique de la contraction musculaire
Trait épais: filament de myosine
Trait fin: filament d'actine
Espace entre deux traits verticaux: sarcomère
1 μ = 1/1000 mm

Cependant, en fournissant de l'énergie, l'accumulateur se décharge. De même, l'ATP se transforme en ADP (adénosine-*di*phosphate).
Tous les processus engagés dans la contraction musculaire sont donc dépendants de la présence de cet ATP. Voyons donc comment ce fournisseur d'énergie est régénéré constamment, pour qu'il y ait possibilité de faire plusieurs contractions musculaires à la suite.

3. Aspect biochimique

3.1. Mobilisation d'énergie par voie anaérobie

Le problème de la mobilisation d'énergie consiste toujours à mettre de l'ATP à disposition de la cellule musculaire. Cette mobilisation peut se faire de manière anaérobie, c'est-à-dire sans avoir besoin d'un apport d'oxygène extérieur. Pour cela, trois voies sont possibles:

3.1.1. Réserve interne en ATP

Dans chaque cellule musculaire se trouve une petite réserve en ATP. Cette réserve permet au muscle de réagir immédiatement et à n'importe quel moment. Cette réserve est cependant restreinte et ne suffit que pour un travail musculaire durant au maximum 2 à 3 secondes.

3.1.2. Réserve en créatine-phosphate (CP)

Dans chaque cellule d'un muscle se trouve aussi une réserve en créatine-phosphate. Cette substance chimique peut libérer une molécule de phosphate au profit de l'ADP, qui se trouve ainsi régénéré en ATP. Cette substance permet donc de «recharger l'accumulateur».
Par la présence de cette CP, la cellule musculaire a une réserve pour un travail d'environ 30 secondes au maximum. Après cette durée, ce réservoir est aussi épuisé.

3.1.3. Glycolyse anaérobie

Une réserve supplémentaire d'énergie se trouve dans chaque muscle sous forme de glycogène (amidon d'origine animale). Il peut être rapidement transformé en glucose («sucre de raisin»). Il subit ensuite une série de réactions chimiques aboutissant à l'acide pyruvique. Le dernier pas de la dégradation est finalement la transformation en acide lactique. Cette transformation libère de l'énergie qui permet à son tour de reformer de l'ATP à partir d'ADP et de phosphate.
La dégradation du glucose en acide lactique peut donc fournir de l'énergie pour la contraction musculaire. Ce processus est cependant assez peu économique, parce que l'on ne peut reformer que deux molécules d'ATP, à partir de chaque molécule de glucose (fig. 4).
C'est pourtant grâce à cette glycolyse anaérobie que la cellule musculaire peut encore fournir un travail, sans qu'il y ait apport

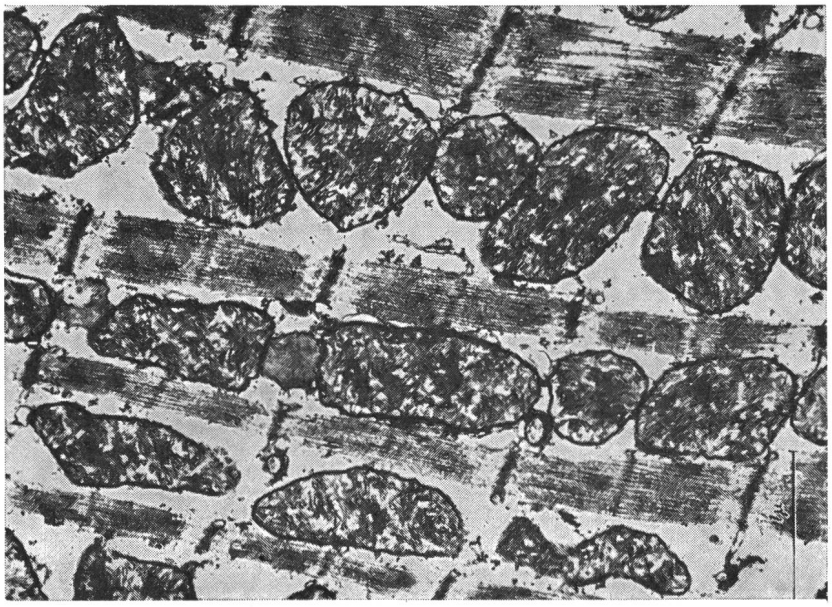

Fig. 3:
Coupe de muscle, vue au microscope électronique
On distingue les fibrilles musculaires, alternant avec des chapelets de mitochondries
En bas à droite, longueur unité: 1 μ = 1/1000 mm

d'oxygène ou de nourriture de l'extérieur. Ce mode d'utilisation d'énergie atteint un maximum après 50–60 secondes de charge environ et s'épuise après une durée maximale de deux minutes. (Au-delà, il n'y a plus de formation d'ATP exclusivement de cette manière.)
Le travail s'arrête, car la production d'acide lactique a pour inconvénient majeur d'amener une acidification du milieu cellulaire d'abord, puis encore de l'organisme entier, car l'acide lactique diffuse des cellules dans le sang.
Cette acidification provoque des douleurs musculaires et une perte de force. Globalement, cela se traduit aussi par des symptômes désagréables comme des maux de tête, et le souffle court (dyspnée) principalement.

3.2. Mobilisation d'énergie par voie aérobie (oxydative)

Nous avons cité les fibrilles et le noyau comme composantes essentielles de la cellule musculaire. La cellule ne contient pourtant pas uniquement cela. On y trouve encore des organelles importants appelés *mitochondries.* (fig. 3) Elles ont l'aspect de bâtonnets ou de boules minuscules. Leur rôle peut se comparer le mieux à celui d'usine électrique, marchant au moyen de réactions chimiques. Par leur action, elles transforment leur «nourriture»: de l'acide acétique activé (acetyl-CoA), en gaz carbonique (CO_2) et en ions hydrogène (H^+).
La chaîne de réactions chimiques qui est à l'origine de ces transformations s'appelle le cycle de KREBS (du nom de celui qui l'a découvert), ou encore cycle tricarboxylique. La substance de base, «l'acide acétique activé», peut provenir à son tour ou de la dégradation du glucose ou de l'oxydation d'acides gras libres (FFA). Ces deux substances sont amenées au muscle par le sang. Le clucose provient de la réserve en glycogène du foie et les acides gras des dépôts de graisse sous-cutanée et d'autres origines.
Dans les mitochondries se déroulent aussi les processus résumés sous le nom de «chaîne respiratoire». Son rôle est de lier les ions hydrogènes (H^+) formés dans le cycle de KREBS à l'oxygène apporté par le sang. Cette réaction, bien connue sous le nom de «gaz tonnant», crée de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène et libère en plus une grande quantité d'énergie. Cette énergie peut être utilisée pour la reformation d'ATP à partir d'ADP et de phosphate. On a ainsi à nouveau une réserve d'énergie disponible pour la contraction musculaire.
Le bilan énergétique de ce groupe de réactions oxydatives ou aérobies est beaucoup plus favorable que celui de la glycolyse anaérobie. En effet, en brûlant une molécule de glucose en présence d'oxygène, on peut «recharger» 38 molécules d'ATP. En brûlant des graisses on arrive même à 130 molécules d'ATP par molécule d'acide gras. (fig. 4)
L'obtention d'énergie par voie oxydative est possible aussi longtemps que de l'oxygène d'une part, et du glucose ou des acides gras, d'autre part, soient présents comme substrats.

Bilan energétique :

GLYCOLYSE ANAEROBIE

$$\boxed{\text{GLUCOSE}} + 2\ \text{PHOSPHORE} + 2\ \text{ADP} \longrightarrow 2\ \text{LACTATE} + \boxed{2\ \text{ATP}}$$

OXYDATION:

$$\boxed{\text{GLUCOSE}} + 38\ \text{PHOSPHORE} + 38\ \text{ADP} + 6\ O_2 \longrightarrow 6\ CO_2 + 44\ H_2O + \boxed{38\ \text{ATP}}$$

$$\boxed{\text{(FFA) ACIDE PALMITIQUE}} + 132\ \text{PHOSPHORE} + 132\ \text{ADP} + 23\ O_2 \longrightarrow 16\ CO_2 + 146\ H_2O + \boxed{130\ \text{ATP}}$$

Fig. 4:
Bilan énergétique des mobilisations d'énergie par voie anaérobie et aérobie
Voir les explications dans le texte.

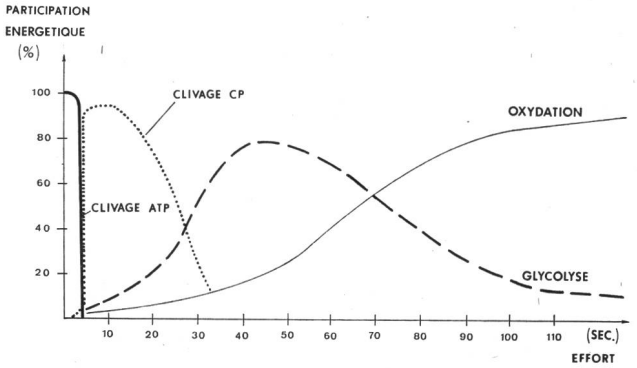

Fig. 5:
Participation énergétique des différents processus fournisseurs d'énergie lors d'un effort physique intense.
(tiré de Keul)

4. Répercussions sur la conception de l'entraînement

Les processus biochimiques décrits interviennent dans la mobilisation d'énergie en proportions différentes, selon la durée de l'effort physique accompli. (fig. 5).
Ces différents systèmes biochimiques peuvent être développés séparément en adaptant dans l'entraînement la durée, l'intensité et le nombre de répétitions de l'effort physique.

4.1. Efforts physiques soutenus durant 3 à 4 secondes

La cellule musculaire s'adapte aux efforts de courte durée par une augmentation de la quantité des protéïnes spéciales que sont l'actine et la myosine. (= augmentation de la force). La réserve en ATP ne se modifie guère.

4.2. Efforts physiques soutenus durant 20 à 30 secondes

La réaction d'adaptation cellulaire s'exprime principalement par une augmentation des réserves de créatine-phosphate (CP) et par une augmentation d'activité de l'enzyme créatine-phosphokinase. Il a pour fonction de dégrader la CP.

4.3. Efforts physiques soutenus durant 40 à 60 secondes

Ce genre d'effort provoque surtout une amplification des réserves en glycogène de la cellule musculaire et encore une augmentation de l'activité du système enzymatique responsable de la glycolyse anaérobie. Les cellules musculaires, puis

l'organisme tout entier s'habituent peu à peu aux concentrations élevées en acide lactique qui apparaîssent lors de ce type de mobilisation d'énergie (= résistance locale et générale).

4.4. Efforts physiques soutenus durant plus d'une minute

Lorsque la durée de l'effort atteint une minute, la mobilisation d'énergie par voie oxydative (aérobie) fait environ 50 pour cent du total. Sitôt que la durée atteint deux minutes et plus, presque la totalité des besoins énergétiques sont satisfaits par la voie oxydative.
Des efforts de longue durée provoquent une multiplication et un agrandissement des mitochondries. Ils induisent en plus une augmentation d'activité des systèmes enzymatiques du cycle de KREBS et de la chaîne respiratoire, contenus dans ces mitochondries. A la longue, une cellule musculaire entraînée de cette manière peut transformer et utiliser une quantité double en glucose, acides gras et oxygène que ne le peut une cellule non entraînée (= endurance locale).
En améliorant la capacité oxydative des mitochondries on augmente aussi les exigences posées au système de transport d'oxygène. Il faut donc une capacité de transport d'oxygène plus élevée. Elle est obtenue par l'augmentation de la quantité d'hémoglobine totale, par un agrandissement du volume cardiaque et par une meilleure distribution du sang dans le muscle. La somme de tous ces processus d'adaptation peut être mesurée en laboratoire. (fig. 6) Pour cela, on mesure entre autres la capacité maximale d'absorption d'oxygène durant l'effort (= endurance générale).
Pour fixer les idées, disons qu'un homme entre 20 et 30 ans peut absorber en moyenne un maximum de 3 litres d'oxygène par minute, ou environ 40 ml d'oxygène par minute et par kilo de poids corporel.
Les coureurs de fond à skis ou les cyclistes atteignent cependant des valeurs de 6 litres/mn ou 80 ml/mn et par kilo de poids corporel.

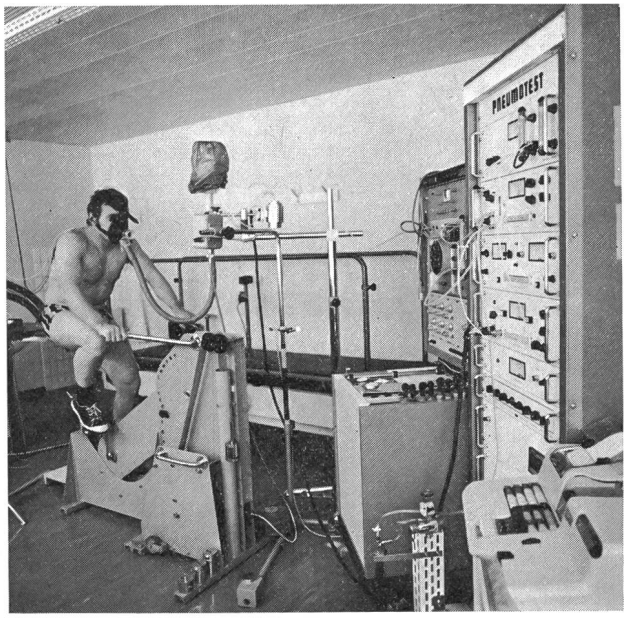

Fig. 6:
Détermination de la capacité maximale d'absorption d'oxygène en laboratoire. L'on voit la personne examinée assise sur la «bicyclette» ergométrique, munie d'un masque qui permet de collecter l'air expiré.
Cet air expiré est analysé ensuite automatiquement dans la série d'appareillages située sur la droite.

Références

- Astrand, P.O.; Rodahl, K.
  Textbook of Work Physiology
  McGraw-Hill, New York, 1970
- Keul, J.; Doll, E.; Keppler, D.
  Muskelstoffwechsel; die Energiebereitstellung in Skelettmuskel als Grundlage seiner Funktion.
  Johann Ambrosius Barth, München, 1969
- Lehninger, A.L.
  Bioenergetics
  W.A. Benjamin Inc., New York, 1965
- Schönholzer, G.; Weiss, U.
  Begriffe aus dem Gebiet der Leistungsbiologie und der Trainingslehre
  Jugend und Sport, **27**, 295–297 (1970)
- Biological Sciences, Blue version
  American Institute of Biological Sciences
  Houghton Mifflin Co., Boston, 1963

Adresses des auteurs: Dr méd. Hans Howald,
Chef de l'Institut de recherches de l'EFGS
CH-2532 Macolin/Suisse
Hugo Moesch,
Biochimiste, Institut de recherches de l'EFGS
CH-2532 Macolin/Suisse

Zusammenfassung

Es werden die anatomischen, physiologischen und biochemischen Grundlagen der Muskelarbeit dargestellt und Konsequenzen für die Trainingsgestaltung besprochen.
Die vorliegende Arbeit ist in deutschsprachiger Fassung in Nr. 1/1972 von «Jugend und Sport» erschienen. Durch die Neukonzeption der Lehrbeilage «Forschung – Training – Wettkampf» ist es nun für «Jugend und Sport» zu einer Doppelpublikation gekommen, welche unsere deutschsprechenden Leser sicher mit Rücksicht auf ihre Kollegen französischer Zungen in Kauf nehmen werden.