

# Electrostimulation : un révélateur de l'adaptation musculaire

1ère partie : les courants de basse fréquence

## Physiologie

A.X. BIGARD, F. CANON,  
C.Y. GUEZENEC

CERMA, 91228 Brétigny sur Orge

*Le muscle est un tissu dont les caractéristiques initiales fixées génétiquement sont susceptibles d'évoluer en fonction du type de travail qu'il fournit. Il s'agit donc d'un tissu très adaptable qui, comme vous le savez, répond aux séances d'entraînement en modifiant ses propriétés métaboliques et contractiles. L'électrostimulation musculaire qui permet de simuler l'activité des neurones, est un moyen très élégant d'étudier les modifications du muscles. Cette première partie montre comment le muscle évolue sous l'effet des contractions lentes.*

Le muscle strié squelettique est un tissu hétérogène et adaptable. Il est hétérogène par le fait qu'il est composé de plusieurs types de fibres caractérisées par des propriétés structurales, contractiles, et métaboliques différentes, et que ces fibres possèdent un arrangement original au sein du muscle. Ce tissu est adaptable, et répond à plusieurs types de stimuli, parmi lesquels on peut individualiser l'activité contractile, et différents facteurs endocriniens.

L'activité neuronale détermine largement les propriétés du muscle. Ainsi, les neurones moteurs (motoneurones) innervant les unités motrices de type lent (présentes dans les muscles dits «toniques», intervenant dans la posture) ont une fréquence de décharge variant entre 5 et 15 Hz. Inversement, les muscles «phasiques» à fonction locomotrice, essentiellement composés d'unités motrices rapides, reçoivent une innervation dont la fréquence de décharge oscille entre 30 et 60 Hz. Des expériences d'innervation croisée ont montré qu'un muscle phasique réinnervé par des neurones «lents» évoluait en muscle tonique de type postural.

L'électrostimulation (ES) consiste à appliquer un courant de stimulation électrique se substituant au courant de stimulation physiologique véhiculé par les motoneurones des unités motrices. Il apparaît clairement que les courants

de basse fréquence ( $10 \pm 5$  Hz) auront des effets très différents de ceux induits par les courants de moyenne fréquence (40 à 100 Hz) ou de haute fréquence ( $> 100$  Hz) sur les caractéristiques histologiques et métaboliques du muscle stimulé.

### CHEZ L'ANIMAL

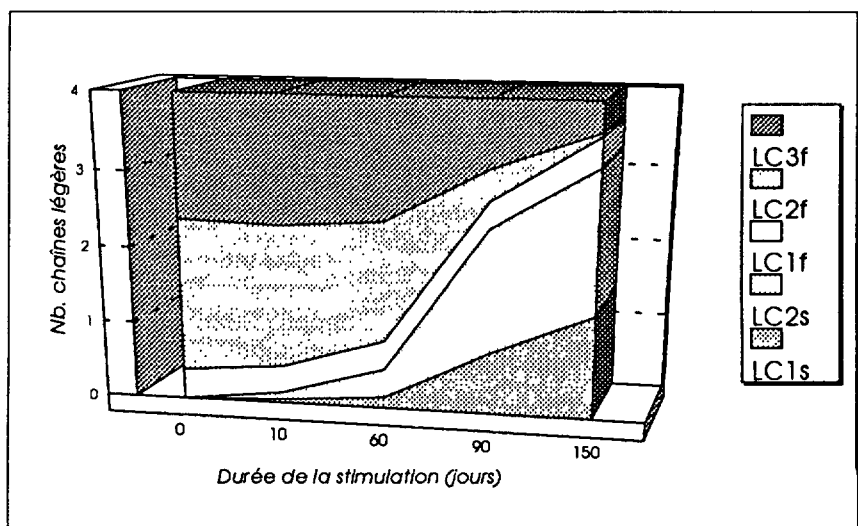
#### Typologie musculaire

Les fibres musculaires peuvent être classées en différents types selon leurs caractéristiques histochimiques, contractiles et métaboliques. Ainsi, on distingue les fibres de type I (à vitesse

de contraction lente et à métabolisme oxydatif), de type IIA (à vitesse de contraction rapide, et à métabolisme glycolytique et oxydatif) et de type IIB (à vitesse de contraction rapide et à métabolisme glycolytique). On identifie également un type IIC (forme de transition entre les fibres de type IIA et les fibres de type I).

L'ES de basse fréquence appliquée en continu ou en intermittent, est à l'origine, chez l'animal de laboratoire, d'une transformation progressive des fibres musculaires dans le sens type IIB  $\rightarrow$  IIA  $\rightarrow$  IIC  $\rightarrow$  I. Ce remaniement passe par un remplacement progressif des unités motrices rapides en unités

**Figure 1 :** Evolution de l'expression quantitative des différents types de chaînes légères lentes (LC1s et LC2s) et rapides (LC1f, LC2f, LC3f) en fonction de la durée de l'électrostimulation.



motrices lentes. Cette transformation est étroitement dépendante du temps d'application du courant, et de la durée du conditionnement : chez le lapin, stimulé en continu 24h/jour, il faut environ une semaine pour transformer toutes les fibres IIB d'un muscle en fibres IIA, IIC et I. La transformation complète en fibres I prend environ 20 semaines.

### Protéines contractiles

La myosine est une protéine musculaire contractile, composée de deux paires de chaînes légères et d'une paire de chaînes lourdes, chacune de ces sous-unités protéiques présentant différentes «variétés» ou «isoformes».

#### Chaînes légères

L'ES chronique de basse fréquence est à l'origine d'une transition des isoformes rapides de chaînes légères (LC1f, 2f et 3f) en isoformes lentes (LC1s, 2s), comme le montre la figure 1, ce phénomène s'expliquant par des variations parallèles des ARN messagers codant pour chacune de ces protéines.

#### Chaînes lourdes

Dans le muscle squelettique adulte, les chaînes lourdes de la myosine existent sous trois isoformes possibles, nommées MHCI, MHCIIa et MHCIIb, exprimées respectivement au sein des fibres I, IIA et IIB. Sous l'effet de l'ES de basse fréquence, ces isoformes de MHC sont redistribuées, avec un remplacement progressif des isoformes rapides MHCIIa et MHCIIb par l'isoforme lente MHCI. La cinétique de cette transformation au sein d'un muscle rapide permet de mettre en évidence, dans un premier temps, une diminution de l'expression de l'isoforme IIB, suivie d'une augmentation de l'expression de l'isoforme IIA, alors que l'apparition en grande quantité de la forme I ne se fait qu'après quelques semaines.

En somme, chez l'animal, l'ES prolongée par voie neuronale d'un muscle rapide au moyen d'un courant de basse fréquence (10 Hz), entraîne un remodelage complet des protéines contractiles, ce qui a pour conséquence de transformer progressivement ce muscle rapide en un muscle lent, au

fort pourcentage de fibres de type I. Ces modifications d'ordre histochimique sont parfaitement corrélées à des variations parallèles de l'expression des chaînes légères et lourdes de la myosine. La cinétique et l'intensité de ce remodelage sont fortement dépendants de la durée de conditionnement.

Il est intéressant d'étudier la place prise par la transformation des fibres d'une part, et par le remplacement de fibres en place par d'autres fibres aux caractéristiques différentes d'autre part. La preuve a pu être faite qu'il existait précocement un remplacement d'une partie de la population de fibres existantes, par des fibres jeunes, d'un type différent. Cependant, il semble bien que le processus majeur de remodelage du muscle repose sur la transformation de fibres en place.

### Les modifications structurales du muscle

La transformation des caractéristiques des protéines contractiles du muscle sous l'effet de l'ES s'accompagne de modifications structurales et morphologiques importantes.

On enregistre en premier lieu une réduction de toutes les **structures impliquées dans les processus de captation du calcium**, d'où une diminution précoce de la vitesse de contraction du muscle et une augmentation de la durée de sa phase de relaxation, éléments caractéristiques des muscles toniques lents.

Le contenu des fibres de muscles rapides en mitochondries est largement augmenté par l'ES prolongée. L'augmentation de la densité mitochondriale est essentiellement liée à une véritable multiplication du nombre d'organelles ; celle-ci est très précoce, et détermine, au sein de ces muscles rapides, une densité mitochondriale supérieure à celle des muscles lents à fonction posturale.

Le réseau capillaire du muscle électrostimulé est profondément modifié par l'application prolongée de courants excitomoteurs de basse fréquence. La densité capillaire, qui représente la nombre de capillaires par

unité de surface, est augmentée dès les premiers jours d'électrostimulation. Le développement du réseau capillaire est principalement contrôlé par le débit sanguin local, qui peut être plus que doublé après un mois d'ES.

### La morphologie du muscle

Le muscle rapide électrostimulé est le siège d'une hypotrophie de l'ensemble des fibres. Cette réduction du calibre des fibres n'est que le résultat d'une amyotrophie, sans dégénérescence cellulaire. Ainsi, le nombre de fibres au sein du muscle semble respecté. Les fibres du muscle électrostimulé deviennent plus homogènes en taille, et la distribution de leur calibre est centrée autour d'une valeur inférieure, proche de la surface moyenne de section des fibres d'un muscle lent. Ce processus adaptatif morphologique semble très précoce.

### Les propriétés métaboliques du muscle

Au plan métabolique, les propriétés du muscle squelettique peuvent être abordées selon différents aspects, parmi lesquels le niveau d'utilisation des substrats, et les activités des différents enzymes-clés des voies métaboliques.

#### Le niveau d'utilisation des substrats

L'application prolongée d'un courant excitomoteur de basse fréquence permet au muscle rapide réalisant un travail isométrique, de consommer moins de glucose circulant, au profit des acides gras libres, et d'augmenter ses réserves en glycogène.

#### Les activités enzymatiques musculaires

L'ES continue de basse fréquence est à l'origine d'une réduction importante des activités enzymatiques glycolytiques et glycolytiques qui assurent l'approvisionnement et l'utilisation métabolique du glucose.

Ainsi, la capacité du muscle rapide à dépolymériser le glycogène est réduite (baisse des activités de la glycogène-phosphorylase ou GPASE, de la phosphofructokinase ou PFK et de la lactico-déshydrogénase ou LDH

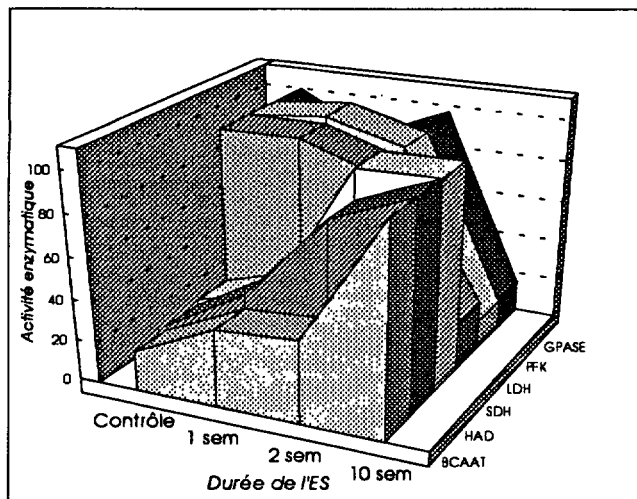


Figure 2 : Evolution de certaines activités enzymatiques en fonction de la durée de l'électrostimulation.

par exemple, comme le montre la figure 2). Il existe à cet égard indéniablement un effet dose de l'ES, les activités enzymatiques diminuant d'autant plus fortement que l'ES est intense et prolongée.

La synthèse de glycogène au sein du muscle est en partie contrôlée par un enzyme, la glycogène synthase. L'activité de cet enzyme ne varie que peu comparativement aux enzymes précédents. Après une faible augmentation initiale de son activité, avec un pic à la 2<sup>e</sup> semaine, celle-ci diminue pour atteindre, à la 8<sup>e</sup> semaine, des valeurs inférieures de 18% à celles de muscles rapides contrôles, et similaires à celles de muscles lents. De même, bien que le site de la néoglucogénèse soit principalement hépatique et accessoirement rénal, il existe, au sein du muscle squelettique, un des deux enzymes-clefs de cette voie métabolique : la fructose 1-6 biphosphatase, dont l'activité est très notablement et régulièrement diminuée au cours du temps chez les animaux électrostimulés.

Enfin, nombreuses sont les données de la littérature qui mettent en évidence l'importante augmentation du pouvoir oxydatif du muscle rapide électrostimulé à basse fréquence. Ainsi, les activités des enzymes-clefs du cycle de Krebs sont considérablement augmentées (l'activité de la succinate déshydrogénase ou SDH est multipliée par 8 en 2 semaines, comme le montre la figure 2) ; il en est de même des activités des enzymes impliqués dans l'oxydation des acides gras, comme la 3-hydroxyl CoA déshydrogénase ou HAD, et pour les activités du

métabolisme des acides aminés, comme celle des aminotransférases des acides aminés branchés ou BCAAT. Ces modifications vont de pair avec l'augmentation du nombre de mitochondries, dont la composition enzymatique varie elle aussi sous l'effet du conditionnement.

### Conclusions

L'utilisation sur des modèles animaux, de courants excitomoteurs de basse fréquence (10 Hz) au cours de protocoles expérimentaux assez contraignants (ES permanente, ou prolongée 6 à 8 h/j, jusqu'à 12 semaines), a permis de mettre en évidence la qualité plastique du muscle. C'est ainsi qu'un muscle rapide composé de 90 à 95% de fibres rapides (de type IIA et IIB) acquiert en 10 semaines toutes les propriétés d'un muscle lent de type postural : protéines contractiles, propriétés métaboliques, structurales, réseau capillaire. Cette transformation constitue une véritable adaptation fonctionnelle allant dans le sens d'une augmentation de la résistance à la fatigue.

### DONNEES RECUEILLIES CHEZ L'HOMME

Si les effets des courants excitomoteurs de basse fréquence appliqués par voie axonale sont maintenant bien connus chez l'animal de laboratoire, il n'existe pas, à notre connaissance chez l'Homme, de données expérimentales sur les effets structuraux et métaboliques de l'ES prolongée de basse fréquence, appliquée par voie neuronale ou de surface. Une étude a cependant été réalisée sur les effets aigus de l'application par

voie superficielle (transcutanée) de deux gammes de courants excitomoteurs. L'ES permanente du muscle vaste externe de la cuisse par un courant unidirectionnel de 10 Hz, avec une intensité correspondant au maximum tolérable, est à l'origine d'une déplétion glyco-génique modérée, que la durée de la séance soit de 30 ou de 60 min (respectivement -24 et -35% des réserves en glycogène). La déplétion en glycogène constatée après la séance de 60 min d'ES à 10 Hz paraît se faire principalement au sein des fibres rapides de type IIA et IIB, tandis que le stock de glycogène des fibres I ne semble pas altéré. De même, l'augmentation de l'acide lactique musculaire sous l'effet de l'ES ne semble pas statistiquement influencée par la durée d'application du courant.

Ce travail ne laisse rien présager des effets à long terme de ce type de conditionnement. Cependant, ces données permettent de rappeler que les conditions expérimentales sont fondamentalement différentes de celles réalisées au cours des études sur le modèle animal. Il faut en particulier rappeler que l'ES directe sur un tronc nerveux moteur, permet le recrutement de l'ensemble des unités motrices, dès lors que l'intensité du courant délivré est suffisante. Chez l'Homme, l'intensité du courant est intimement liée au seuil de tolérance individuel, très variable suivant les sujets. On peut logiquement penser que dans les conditions d'ES de surface réalisées chez l'Homme, à distance du nerf moteur, ce n'est qu'une partie de l'ensemble des fibres musculaires qui sera recrutée ; les axones moteurs de plus large diamètre, au seuil d'excitabilité le plus bas, et innervant principalement les unités motrices rapides (fibres de type IIA et IIB) sont alors susceptibles d'être dépolarisés en première intention. Malgré l'absence de données structurales, métaboliques et de biochimie contractile sur les conséquences à long terme de l'application en surface de courants excitomoteurs de basse fréquence, on peut supposer que les modifications adaptatives ne sont pas aussi complètes que chez le modèle animal, où le type d'excitation neuronale est tel que c'est l'ensemble des motoneurons qui est recruté.