

# Electrostimulation : un révélateur de l'adaptation musculaire

## 2ème partie : les courants de moyenne et haute fréquence

### Physiologie

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

CERMA, 91228 Brétigny sur Orge

*Dans la première partie de cet article (EquAthlon n° 17), Xavier BIGARD et ses collaborateurs avaient montré les effets de l'électrostimulation musculaire dans le cas d'application de courants de basse fréquence (10 Hz). Ainsi, il apparaissait, chez l'animal de laboratoire, toute une série de modifications du muscle tendant à lui conférer les propriétés d'un muscle lent. Qu'en est-il maintenant de l'effet des courants de moyenne et haute fréquence (40 à 100 Hz) ?*

D'anciens travaux avaient montré que les motoneurones des muscles phasiques (rapides) déchargeaient à des fréquences variant entre 40 et 60 Hz. La réinnervation de muscles lents par des motoneurones ayant une fréquence de décharge élevée modifie leurs propriétés contractiles en augmentant la vitesse de contraction, et en les transformant en muscles phasiques. Il est donc intéressant d'étudier les effets structuraux et métaboliques de l'application chronique, sur le muscle squelettique tonique, à vitesse de contraction lente, de courants excitomoteurs dont la fréquence se rapproche de celle retrouvée au niveau des motoneurones rapides. Il est ici aussi important de dissocier les études réalisées chez l'Homme, de celles au caractère plus fondamental, réalisées sur modèle animal.

### CHEZ L'ANIMAL

Différents protocoles expérimentaux ont été montés, permettant d'utiliser des fréquences de courants dites phasiques (de 40 à 100 Hz), sur des muscles rapides ou lents, dénervés ou conservant leur innervation naturelle. La dénervation du muscle permet de l'isoler de toute afférence, donc de toute autre activité électrique, et de toute substance chimique éventuellement véhiculée par les motoneurones en place.

### Données histochimiques

On a appliqué par exemple chez le Rat un courant excitomoteur de 100 Hz, à raison de 36 secondes de stimulation par minute, pendant 1 à 9 mois. L'application de ce type de courant sur des muscles phasiques ou toniques, coupés de toute afférence nerveuse, était à l'origine d'une transformation complète des fibres de type I en type II. D'autres études ont montré que cette transformation complète ne dépendait pas de la fréquence (40, 60 ou 100 Hz) du courant excitomoteur.

Lorsque le muscle électrostimulé reste innervé, les résultats sont moins nets. Ainsi, dans un muscle rapide de Lapin stimulé par un courant de 60 Hz pendant 5 semaines, on a constaté une certaine augmentation du pool de fibres lentes (type I). A l'inverse, un muscle lent soumis à une électrostimulation à 100 Hz, voit augmenter son pool de fibres de type IIA (rapides oxydatives).

### Protéines contractiles

#### Chaînes légères de la myosine

Dans l'étude précédemment citée sur le muscle rapide de Lapin, les auteurs constataient une nette augmentation de l'expression des chaînes légères lentes LC1s et LC2s, ce qui confirmait leurs résultats histochimiques (augmentation des fibres lentes).

#### Chaînes lourdes de la myosine

Une étude a montré que l'électrostimulation d'un muscle lent dénervé de Rat à 100 Hz (36 s/min, 24h/jour, durant 4 mois), était à l'origine d'une augmentation très importante de l'expression des chaînes lourdes de type rapide. De plus, ce phénomène ne paraît pas dépendre directement de la fréquence du courant excitomoteur utilisé (40, 60 ou 100 Hz). Enfin, la preuve a été apportée que les variations enregistrées dans la composition des fibres en myosine étaient liées à la transformation de fibres préexistantes, et non à l'apparition de fibres régénératives.

L'ensemble de ces résultats peut paraître contradictoire, et souffrir du manque d'une interprétation uniciste. Cependant, il convient de rappeler que la dénervation d'un muscle lent, tonique, à fonction posturale, et ayant une activité contractile très importante, induit une augmentation de l'expression des isoformes rapides des chaînes lourdes et légères de la myosine, et par voie de conséquence, une augmentation du pool de fibres rapides (types IIA et IIB) et intermédiaires (types IIAB, IIC et IB). Cela ne fait que confirmer le rôle de l'activité neuronale sur l'expression des chaînes lourdes de la myosine, et le probable contrôle négatif exercé par les basses fréquences de décharge des motoneurones (10 Hz) sur l'expression de l'isoforme rapide IIb des chaînes lourdes de la

myosine. La dénervation, et la levée de l'effet inhibiteur de l'activité neuronale sur l'expression des chaînes rapides, est à l'origine d'une augmentation du pool des fibres de type II au sein du muscle.

Sur le muscle tonique dénervé, l'application d'un courant excitomoteur d'une fréquence semblable à celle des motoneurons rapides ne semble pas suffisamment efficace pour générer une activité contractile capable de réprimer l'expression des chaînes rapides de la myosine. En revanche, sur le muscle phasique conservant son activité neuronale naturelle, l'adjonction d'une activité contractile supplémentaire par le biais d'un courant excitomoteur de fréquence rapide (40-100 Hz), paraît dans ce cas renforcer l'effet inhibiteur de l'activité contractile sur l'expression des isoformes rapides des chaînes légères de la myosine (LC2f et LC3f), ainsi que sur le pool de fibres rapides de type II.

Cette interprétation niant l'influence propre de la fréquence d'un courant excitomoteur, en renforçant le rôle de l'activité contractile sur l'expression des différents types de protéines au sein du muscle, n'est cependant pas en accord avec d'autres résultats expérimentaux. Ainsi, malgré le maintien d'une activité neuronale de base, l'application d'un courant de 100 Hz augmente l'expression des isoformes rapides de la myosine, ce qui tend donc à attribuer à la fréquence du courant excitomoteur un effet propre sur l'expression des différentes isoformes de la myosine.

### Modifications structurales du muscle

Peu de données sont disponibles concernant la structure même des fibres ; on peut cependant retenir un effet de l'électrostimulation de fréquence 40 Hz (5 s de stimulation toutes les 20 s) appliquée au niveau de muscles rapides, sur l'augmentation de la densité mitochondriale. Cette augmentation de la densité volumique des mitochondries reflète une augmentation simultanée de leur nombre et de leur volume.

#### La capillarisation du muscle

Il a été mis en évidence une croissance du réseau capillaire au niveau du muscle rapide électrostimulé à 40 Hz, sous réserve que l'électrostimulation soit appliquée avec une quantité d'activité contractile suffisante (36000 stimuli/h, 8h/jour pendant au moins 2 semaines, et plus encore après 4 semaines). Au sein du muscle squelettique innervé, l'électrostimulation à 40 Hz semble bien être à l'origine, au cours de l'exercice, d'une augmentation du débit sanguin local plus importante que celle observée au niveau de muscles contrôlés.

### Les adaptations morphologiques

L'électrostimulation à 100 Hz (36 s/min) de muscles phasiques dénervés semble protéger de la protéolyse et de la dégénérescence propres à la dénervation. Au niveau du muscle tonique, la surface de section moyenne des fibres diminue de 98% après dénervation, cette amyotrophie se limitant à 58% lorsqu'un protocole d'électrostimulation est appliqué.

Le calibre des fibres rapides de muscles phasiques conservant leur innervation n'est pas influencé par l'électrostimulation de 40 Hz appliquée en périphérie du nerf moteur pendant 28 jours.

### Les adaptations métaboliques

#### L'utilisation des substrats

Malgré le peu de données disponibles, il ne semble pas que l'utilisation du glucose et le niveau de la glycolyse soient affectés par l'électrostimulation de 40 Hz.

#### Les activités des enzymes musculaires

L'électrostimulation à 40 Hz du muscle squelettique normalement innervé, à des fréquences couramment rencontrées au niveau des motoneurons rapides, paraît être à l'origine d'une augmentation de ses activités enzymatiques oxydatives. Ainsi, l'activité de la SDH, enzyme du cycle de Krebs, est principalement augmentée au sein

des fibres de type IIB, où elle est doublée en deux semaines.

Le muscle innervé et électrostimulé à 40 Hz est le siège d'une augmentation de ses capacités oxydatives ; cela confirme les modifications structurales enregistrées, faisant état d'un accroissement significatif de la densité mitochondriale et d'un développement substantiel du réseau capillaire. Dans ce cadre expérimental, l'ensemble de ces paramètres semble covarier, et aller dans le sens d'une augmentation du pouvoir oxydatif du muscle.

### Conclusions

L'interprétation des effets sur le muscle, de courants excitomoteurs d'une fréquence similaire à celle observée au niveau des unités motrices, pose un certain nombre de problèmes, tenant à la diversité des protocoles et en particulier à la présence ou non des afférences nerveuses naturelles du muscle électrostimulé.

L'ensemble des résultats structuraux et métaboliques permet de mettre en évidence sur les muscles conservant leur innervation une augmentation des capacités métaboliques oxydatives. La fréquence d'électrostimulation détermine les variations de l'expression des différentes isoformes des chaînes de la myosine.

### CHEZ L'HOMME

L'utilisation de courants excitomoteurs de surface est répandue chez l'Homme, tant en rééducation fonctionnelle qu'en pratique sportive ; alors que les études des variations des paramètres mécaniques du muscle abondent, il n'existe que peu de données sur les conséquences cellulaires de l'utilisation de cette gamme de courants, tant au plan structural que métabolique.

### Les données histochimiques

Chez cinq patients volontaires, un courant excitomoteur de 33 Hz a été utilisé, transmis par télémetrie à deux électrodes appliquées en périphérie immédiate du nerf fémoral. Ce courant est généré à raison de 5 s toutes les

30 s, pendant une longue période de 6h/j, à une intensité permettant d'engendrer une contraction égale à 50% de la contraction tétanique maximale. Au bout de 5 à 12 semaines de conditionnement, on a constaté une nette augmentation du pool de fibres de type I au sein du muscle vaste externe (de +48 à +4% suivant les sujets).

En pratique sportive, sur un muscle sain, le courant est appliqué au travers du revêtement cutané. Là aussi, après 6 mois d'électrostimulation de surface du muscle grand dorsal (30 Hz, 9 h/j), on a pu observer une nette augmentation du pool de fibres de type I.

Par contre, des courants de haute fréquence (> 100 Hz) appliqués par voie externe, ne semblent pas induire sur le muscle sain de modifications notables du pourcentage des différents types de fibres.

### Les modifications structurales du muscle

L'électrostimulation par voie externe du muscle jumeau externe, avec un courant de haute fréquence (2500 Hz), appliqué 10 s par min, à raison de 10 contractions par séance, entraîne après 19 jours au niveau du muscle une augmentation significative du volume nucléaire moyen, ainsi que du contenu moyen du noyau en ADN (figure 1). Il existe de même une augmentation significative de la fraction mitochondriale au sein des fibres de type I (+7%) et surtout de type II (+55%).

### Les adaptations morphologiques

L'électrostimulation par voie neuronale, à une fréquence de 33 Hz (6 h/j), entraîne une augmentation très significative de la surface moyenne de section des fibres de type I (+35 à +7%) et de type II (+65 à +10%).

De même, il a été montré que l'électrostimulation de surface (60 Hz, 4 s de stimulation suivies de 16 s de récupération, 60 contractions par jour durant 4 semaines) réalisées sur le quadriceps, protégeait des effets du désentraînement simulé par un repos prolongé au lit.

## Les adaptations métaboliques

### La disponibilité en substrats

Une séance d'électrostimulation du quadriceps à 50 Hz (12 s/min) induit un certain degré de déplétion glycogénique, de l'ordre de 13% pour une séance de 30 min, jusqu'à 30% après 60 min, et ceci au sein des trois grands types de fibres. Cette déplétion semble peu dépendante du contenu initial du muscle en glycogène. On n'a que peu de données sur la disponibilité en substrats de muscles entraînés par électrostimulation. Il semble que ce type d'"entraînement" n'induit pas de variation significative de la concentration glycogénique du muscle.

### Les activités enzymatiques

Les données expérimentales ne nous permettent pas d'avoir une idée claire de l'évolution des capacités métaboliques du muscle électrostimulé au moyen de courants de moyenne ou de haute fréquence.

Cependant, une étude a montré que la capacité glycogénolytique du muscle vaste externe n'était pas altérée par l'électrostimulation à 200 Hz : diminution non significative de l'activité de la glycogène-phosphorylase (-16%). Dans ces conditions expérimentales, il ne semble pas exister de variation de la capacité de réduction du pyruvate en lactate, ou de déshydrogénation du pyruvate en lactate par la LDH.

Une seule étude a permis de mettre en évidence, après électrostimulation neuronale à 33 Hz, une augmentation du nombre de fibres caractérisées par une coloration intense après réaction par la SDH. Cette approche purement histochimique ne permet pas de quantifier l'activité enzymatique elle-même, mais permet une appréciation indirecte de la capacité oxydative du muscle. Ainsi, dans ces conditions expérimentales originales, l'activité oxydative moyenne des fibres semble augmentée par l'électrostimulation axonale.

Une autre étude a mis en évidence une augmentation de l'activité de la citrate synthétase au sein du muscle soumis à un programme d'électrostimulation de surface (30 Hz).

## Conclusions

Au terme de cette revue des résultats obtenus chez l'Homme, il s'avère que devant la disparité des protocoles expérimentaux et le nombre restreint d'études, beaucoup de questions restent posées quant aux conséquences histologiques et métaboliques de l'utilisation de courants excitomoteurs de fréquence phasique.

**Le courant appliqué par voie axonale est à l'origine de modifications similaires à celles induites par les courants de basse fréquence ;**

le mécanisme d'action semble donc lié à l'activité contractile elle-même, et non pas à une spécificité de la fréquence phasique du courant.

**Les conséquences histologiques des courants appliqués en surface sont plus difficiles à définir :** alors qu'une étude ne met pas en évidence de modification de l'ultrastructure et des capacités métaboliques du muscle électrostimulé à 200 Hz (après 150 min de stimulation efficace), des résultats opposés sont apportés après application d'un programme d'électrostimulation à haute fréquence (2500 Hz, 32 min de stimulation efficace).

S'il se confirme que l'électrostimulation par voie externe altère les propriétés du muscle, c'est par le biais d'une augmentation de l'activité contractile, et non d'un effet spécifique de la fréquence de stimulation. Cette adaptation se fait dans le sens d'une **augmentation de la capacité oxydative (augmentation de la densité mitochondriale du muscle) et ce, principalement au niveau des fibres rapides de type II.** Cela s'explique par le fait que contrairement à la contraction volontaire, le recrutement des unités motrices ne se fait plus suivant le principe de la taille des axones moteurs, mais suivant le niveau d'excitabilité des motoneurones sous-jacents. Ce sont donc les motoneurones des unités motrices rapides qui seront recrutés en première intention, puisque les plus excitables, le recrutement étant par ailleurs fonction de l'intensité du courant excitomoteur, suivant un gradient allant de la superficie du muscle, vers la profondeur.

## CONCLUSION GENERALE

L'électrostimulation prolongée de basse fréquence, appliquée par voie axonale, permet le recrutement de l'ensemble des unités motrices. L'importante augmentation de l'activité neuronale et par conséquent de l'activité contractile du muscle est à l'origine de la mise en place d'adaptations structurales et métaboliques couramment observées au niveau du muscle squelettique entraîné, mais avec une moindre intensité.

**Il apparaît donc que les mécanismes adaptatifs développés par l'entraînement en endurance ou par l'électrostimulation prolongée de basse fréquence, relèvent de l'augmentation de l'activité contractile du muscle.**

La question se pose de définir le rôle propre de la fréquence des courants utilisés en intermittent, dans la transition du phénotype du muscle squelettique dénervé, d'un type lent en un type rapide. Un grand nombre de résultats

acquis permettent de penser que c'est, dans ce cas, la réduction de l'activité contractile qui lève l'inhibition portée sur l'expression des isoformes rapides des chaînes lourdes de la myosine. **L'ensemble de ces résultats remet donc en cause un effet spécifique de la fréquence de stimulation sur la différenciation musculaire**, même si certaines données expérimentales permettent de penser le contraire.

Les données présentées dans cette revue justifient pleinement l'utilisation de courants d'électrostimulation de moyenne et haute fréquence (> 40 Hz) dans le but d'augmenter le volume musculaire et le niveau de force délivrée. Cependant, ces courants appliqués au travers de la peau induisent des contractions téaniques ; ils ne peuvent ainsi être appliqués de manière prolongée, et leur niveau de tolérance dépend entre autres de la répartition des récepteurs nociceptifs cutanés. **Le seuil de douleur détermine l'intensité maximale admissible du courant de stimulation et son pouvoir de pénétration au travers du muscle.**

Les courants de basse fréquence (10 Hz), dont les conséquences histologiques laissent à penser qu'ils sont indiqués dans le développement de l'endurance musculaire, sont bien tolérés puisqu'ils n'induisent pas de contraction téanique, et peuvent être appliqués pour de très longues durées. Cependant, leur pouvoir de pénétration au travers du muscle demande encore à être précisé en fonction de l'intensité du courant et de la tolérance.

En revanche, **l'indication en pratique sportive** des différentes gammes de courant doit prendre en compte, non seulement les variations d'ordre histomorphologique et métabolique, mais aussi les modifications des propriétés mécaniques du muscle, non étudiées dans le cadre de cette revue.

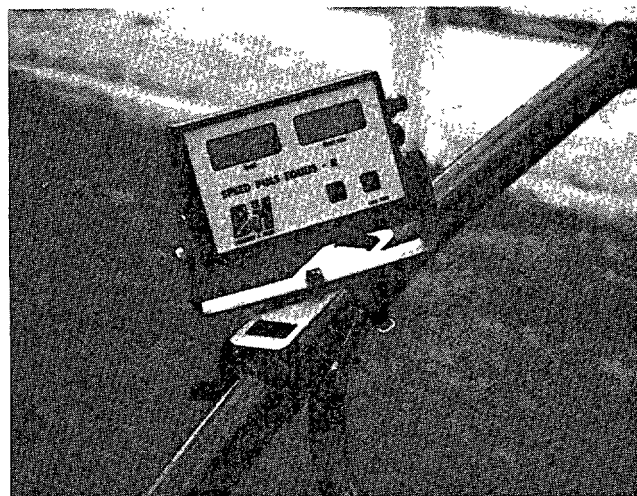
## SPEED PULS EQUUS

Le partenaire de votre réussite

### SPEED PULS EQUUS

#### Affichage

Fréquence Cardiaque  
et Vitesse (réduction  
Kilométrique)  
Vous contrôlez en  
direct l'intensité du  
travail de votre cheval



### SPEED PULS EQUUS RECORDER

#### Affichage et Enregistrement

Fréquence Cardiaque et  
Vitesse (réduction  
kilométrique)  
Vous gardez en référence  
les séances d'entraînement  
spécifique de votre cheval

Le tableau de bord de l'entraînement quotidien de votre cheval

iNTREST int. 28 bis, rue de Paradis 53000 LAVAL Tél. : 43 67 06 03 Fax : 43 67 19 07