

# ÉLECTROMYOSTIMULATION EN MÉDECINE DU SPORT

M. VANDERTHOMMEN (1), J.M. CRIELAARD (2)

**RÉSUMÉ :** Les stimulations électriques excitomotrices (SEEM) sont fréquemment utilisées dans le cadre du renforcement musculaire. En rééducation, leur efficacité pour traiter ou prévenir l'amyotrophie a été largement démontrée. Les courants excitomoteurs sont généralement appliqués à l'aide d'électrodes de surface positionnées en regard des points moteurs musculaires. Les fréquences de stimulation, comprises entre 50 et 100 Hz, induisent des contractions tétanisantes alternant avec des phases de repos. Le rééducateur ou l'entraîneur a la possibilité d'ajuster un certain nombre de paramètres mais les sensations nociceptives liées à l'application du courant électrique demeurent l'inconvénient majeur de la technique. Dans le contexte de la rééducation, l'association des SEEM et des exercices classiques de rééducation présente une efficacité supérieure à l'utilisation isolée de l'une ou l'autre technique. Pour expliquer cette efficacité supérieure, l'hypothèse de mécanismes spécifiques de sommation spatiale et d'une sollicitation métabolique particulière sous SEEM a été avancée.

## INTRODUCTION

Les stimulations électriques excitomotrices (SEEM) se sont développées ces dernières années dans le cadre de la rééducation du muscle atrophié (1) mais également pour renforcer le muscle sain du sujet sédentaire (2) et sportif (3). Les programmes de SEEM, généralement réalisés à l'aide d'électrodes de surface placées en regard des points moteurs musculaires, permettent au kinésithérapeute ou à l'entraîneur de moduler de nombreux paramètres tels que les caractéristiques de l'impulsion, le rapport temps de travail - temps de repos et la durée de la séance. L'inconfort lié aux sensations électriques constitue la limitation majeure de l'efficacité de la technique. Malgré une utilisation largement répandue, les patterns de recrutement du muscle électrostimulé demeurent incomplètement élucidés de même que les mécanismes spécifiques d'adaptation musculaire.

Nos travaux ont permis (a) de préciser les paramètres optimaux des SEEM; (b) d'étudier leur efficacité en terme d'intensité de contraction électro-induite et de gains observés à la suite de programme d'électrostimulation; (c) d'objectiver les contraintes métaboliques liées à la contraction électrostimulée.

**MUSCLE ELECTRICAL STIMULATION IN SPORT MEDICINE**  
**SUMMARY :** Neuromuscular electrical stimulation (NMES) is frequently used to strengthen the normal muscle. In medicine, several investigators have highlighted the value of NMES when treating amyotrophy related to immobilization. The efficacy of NMES of the quadriceps during rehabilitation following anterior cruciate ligament surgery has been well documented. These electrical stimulation programs are composed of stimulation - rest cycles and are performed with the aid of percutaneous electrodes situated in regard to muscle motor points. The stimulation frequency is chosen to induce tetanic contractions and is generally situated between 50 and 100 Hz. During NMES, the trainer or the physiotherapist can accurately modulate a large number of parameters but the sensory discomfort linked to the current intensity remains the major limitation for strength improvement. In the context of rehabilitation, the association of NMES with voluntary exercises is superior to the isolated utilization of the classic program composed of isometric voluntary contractions. To explain this advantage of associating NMES with voluntary contractions, it has been hypothesized that the electrically induced contractions impose specific patterns of muscle recruitment and a particular metabolic sollicitation.

**KEYWORDS :** Electrical stimulation - Muscle contraction - Spatial recruitment - NMES

## PARAMÈTRES OPTIMAUX

L'électrostimulation neuromusculaire consiste à stimuler jusqu'à une valeur seuil la partie terminale des fibres nerveuses motrices au moyen d'un courant électrique appliqué sur la peau et à provoquer, à leur niveau, la genèse d'un potentiel d'action. Ce dernier, transmis au sarcolemme par l'intermédiaire de la plaque motrice, provoque les mécanismes d'interaction des protéines contractiles (4). Le courant optimal sera capable de déclencher le potentiel d'actions tout en permettant la meilleure tolérance du patient (fig. 1).

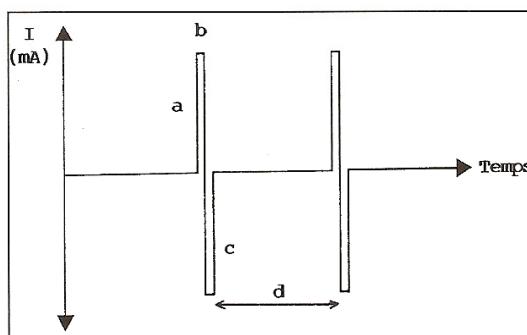


Fig. 1. Représentation schématique de l'impulsion électrique optimale; a = impulsion à front raide; b = durée d'impulsion égale à la chronaxie des fibres nerveuses motrices (0,2 - 0,4 ms); c = impulsion bidirectionnelle et symétrique; d = fréquence induisant une contraction tétanique (50 - 100 Hz).

(1) Chargé de cours adjoint, (2) Professeur, Chef de Service, Université de Liège, Service de Médecine physique et Réadaptation fonctionnelle, CHU, Liège.

Le courant de stimulation le plus adéquat comprend des impulsions électriques de forme rectangulaire (5) et d'une durée égale à la chronaxie des axones moteurs stimulés, comprise entre 0,2 et 0,4 ms (6). Cette sélection paramétrique autorise l'augmentation de l'intensité de stimulation à un niveau permettant l'excitation d'un nombre optimum d'unités motrices.

Dans un souci de totale innocuité, l'impulsion sera immédiatement compensée par une seconde impulsion rectangulaire de même surface, de même forme et de signe opposé (7), permettant de définir un courant bidirectionnel et symétrique.

Les impulsions doivent se succéder à une fréquence comprise entre 50 et 100 Hz pour optimiser le tétonus musculaire (8).

Une électrode dite "excitatrice", de petite taille, sera placée sur le point moteur musculaire et le circuit est fermé à l'aide d'une électrode "indifférente", dont la surface est idéalement trois fois supérieure à celle de l'électrode excitatrice (5).

L'électrostimulation du quadriceps bénéficie d'un montage particulier comprenant trois électrodes excitatrices de petite taille reliées à trois canaux distincts et placées sur les points moteurs des trois chefs superficiels du muscle (vaste interne, vaste externe et droit antérieur). Pour la musculature ischio-jambière, il apparaît judicieux de placer quatre électrodes excitatrices (longue portion du biceps fémoral, courte portion du biceps fémoral, demi-tendineux et demi-membraneux). Dans le cadre de l'électrostimulation du quadriceps, les conditions biomécaniques angulaires optimales sont obtenues avec une flexion de genou à 60°. Par contre, pour la stimulation des ischio-jambiers, le positionnement idéal correspond à 30° de flexion du genou et 90° de flexion de la hanche (9).

## EFFICACITÉ DES STIMULATIONS ÉLECTRIQUES EXCITOMOTRICES

### A. FORCE INSTANTANÉE

Une première évaluation de l'efficacité des SEEM consiste à quantifier, de manière instantanée, la force électriquement évoquée maximale (FEE max.) et à l'exprimer en pourcentage de la force isométrique maximale volontaire (FIMV). Pour le quadriceps, la FEE max. induite à l'aide de paramètres adéquats de stimulation reste généralement comprise entre 60 et 80 % de la FIMV (10, 11). Cette analyse confirme l'efficacité supérieure des contractions volontaires mais précise la possibilité de développer, sous

stimulation électrique percutanée, des contractions musculaires sous-maximales. La force musculaire induite électriquement, plus faible en regard de l'effort volontaire, s'expliquerait par l'impossibilité d'obtenir un recrutement spatial complet suite aux sensations nociceptives accompagnant la stimulation maximale (12) mais également par l'absence de participation des muscles posturaux stabilisateurs (13).

Certains auteurs rapportent l'obtention de contractions quadricipitales électro-induites, parfois supérieures aux potentialités maximales volontaires. Ces résultats ne résistent pas à l'analyse critique car ils sont obtenus dans des conditions contraignantes et irréalisables en pratique médico-sportive. En effet, il s'agit de contractions évoquées à l'aide d'électrodes musculaires implantées (14) ou encore d'une stimulation directe du nerf fémoral (15).

### B. EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT

#### a) Muscle sain

L'entraînement électro-induit apparaît efficace comme méthode de musculation chez le sujet sain (2). Par ailleurs, l'amélioration de la FIMV sera directement proportionnelle à l'intensité de la contraction électro-induite lors des séances d'entraînement (13), confirmant l'intérêt d'utiliser des paramètres adéquats de stimulation.

#### b) Muscle atrophié

En médecine du sport, l'électrostimulation permet de compenser la réduction ou la suppression de l'activité musculaire liée à un traumatisme ou à une intervention chirurgicale de l'appareil locomoteur. L'efficacité des stimulations électriques tétanisantes séquentielles du quadriceps a été largement décrite lors de la rééducation du genou, après ligamentoplastie du ligament croisé antérieur (1, 16) ou arthroscopie (17). Par ailleurs, l'intérêt d'associer la rééducation classique par contraction volontaire aux SEEM apparaît en raison des mécanismes complémentaires d'adaptation musculaire : la rééducation volontaire agit surtout au niveau de la commande musculaire et favorise l'aspect neuronal de l'activité motrice (18) alors que l'électrostimulation engendre directement des modifications trophiques et biochimiques musculaires (19).

## PARTICULARITÉS MÉTABOLIQUES

Afin de préciser l'efficacité des SEEM associées aux contractions volontaires dans le cadre

de l'entraînement ou de la rééducation musculaire, l'hypothèse d'un recrutement spatial spécifique et d'une sollicitation métabolique particulière sous SEEM a été avancée.

#### A. RECRUTEMENT SPATIAL

La tomographie d'émission positonique (TEP) couplée à l'administration d'un bolus d'eau marquée à l'oxygène-15, autorise une évaluation quantitative du débit sanguin local liée à une résolution spatiale de qualité (20) et permet d'apprécier l'activité contractile et le recrutement spatial du muscle électrostimulé (21). Ce protocole démontre, sous SEEM, un recrutement préférentiel des unités motrices superficielles et la réduction proportionnelle de ce recrutement avec l'augmentation de la distance entre la région d'intérêt et l'électrode de stimulation (fig. 2). Ce recrutement spatial particulier s'explique par la réduction de la densité électrique au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'électrode de surface. En conséquence, les branches motoneuronales situées à proximité de l'électrode sont dépolarisées de manière plus aisée que celles situées plus profondément.

Par ailleurs, dans l'hypothèse de l'application de paramètres adéquats de stimulation à une intensité suffisante, le recrutement spatial induit électriquement présente la possibilité d'être largement étendu au niveau de la section transversale du muscle (21).

#### B. SOLICITATION MÉTABOLIQUE

La sollicitation énergétique de la contraction electro-induite a été évaluée par biopsie muscu-

laire (22), dont le caractère relativement agressif n'autorise le prélèvement que d'un nombre restreint d'échantillons. En conséquence, la biopsie autorise une analyse cinétique peu précise de la contraction électro-induite (23) ou doit se limiter à l'étude d'un effort évoqué électriquement de brève durée (24). Par ailleurs, les échantillons musculaires, prélevés au niveau de zones anatomiques différentes, sont susceptibles de présenter une certaine hétérogénéité (25).

Depuis la première application de la spectroscopie en RMN à la physiologie du muscle isolé (26), les développements techniques et la réalisation d'antennes de surface (27) ont permis, par sélection spatiale d'un échantillon superficiel, l'étude biochimique et physiologique du muscle *in situ* chez l'homme (28). Comparées aux techniques biopsiques classiques, la spectroscopie au 31P en RMN présente plusieurs avantages: atraumatique, elle autorise l'analyse répétée d'un même échantillon dans le cadre d'un travail musculaire de longue durée. Les paramètres évalués classiquement par la spectroscopie au 31P sont les composés phosphorylés à haute énergie et le pH (29).

L'étude comparative, par spectroscopie RMN au 31P, des SEEM et des contractions volontaires identiques sur le plan mécanique a démontré que les SEEM entraînent une sollicitation métabolique exagérée par rapport à l'effort mécanique fourni (fig. 3) (30). Cette sollicitation métabolique disproportionnée pourrait résulter d'une activité contractile particulière liée aux éléments suivants :

- L'électrostimulation entraîne le recrutement continu d'une même population d'unités motrices durant tout l'effort, alors que le sys-

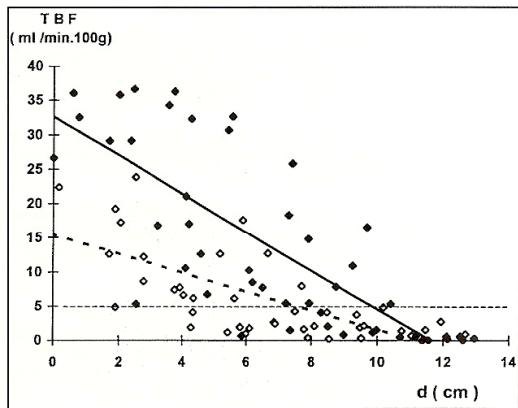


Fig. 2. Relation entre le débit sanguin tissulaire (TBF) calculé dans différentes régions d'intérêt (RI) composant la section transversale de la cuisse et la distance (*d*) séparant la RI de l'électrode de stimulation, dans une cuisse stimulée à 5% du moment isométrique maximal volontaire (MIMV) du quadriceps (symboles ouverts) et dans une cuisse stimulée à 10% du MIMV du quadriceps (symboles pleins). D'après Vanderthommen et coll. (21).

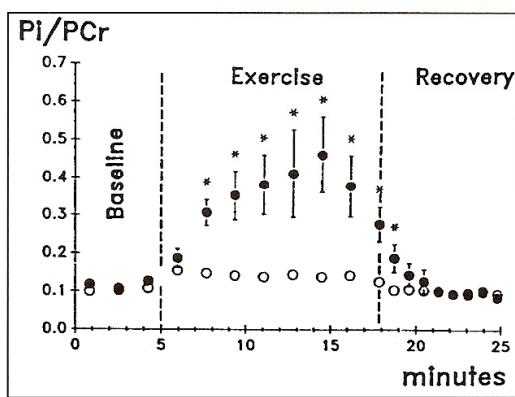


Fig. 3. Modification du rapport Pi/PCr pendant le repos (baseline), l'exercice (exercise) et la récupération (recovery) lors d'un effort volontaire (symboles ouverts) et électrostimulé (symbole pleins) (moyennes  $\pm$  ETM,  $n = 10$ ). \* = différence significative entre les deux modalités de contraction ( $p < 0,05$ ). D'après Vanderthommen et coll. (30).

tème nerveux central remplace régulièrement le pool des unités motrices en activité.

- La fréquence de stimulation imposée est généralement comprise entre 50 et 100 Hz, correspondant à une fréquence maximale de décharge spontanée des unités motrices les plus rapides (fibres IIb) (31).

- Le muscle squelettique est activé de manière asynchrone lors de l'effort volontaire alors que l'électrostimulation recrute les branches motoneuronales de manière synchrone (19).

En conclusion, l'association des deux modalités thérapeutiques différentes (SEEM et contractions volontaires) permet au muscle de bénéficier de mécanismes complémentaires d'adaptation et d'optimiser la réadaptation fonctionnelle.

#### ABRÉVIATIONS

31P : phosphore -31

FEE max : force évoquée électriquement maximale

FIMV : force isométrique maximale volontaire

MIMV : moment isométrique maximal volontaire

NMES : neuromuscular electrical stimulation

PCr : phosphocréatine

Pi : phosphate inorganique

RI : région d'intérêt

RMN : résonance magnétique nucléaire

SEEM : stimulations électriques excitomotrices

TBF : débit sanguin tissulaire

TEP : tomographie d'émission positonique

#### BIBLIOGRAPHIE

1. Draper V, Ballard L.— Electrical stimulation versus electromyographic biofeedback in the recovery of quadriceps femoris muscle function following anterior cruciate ligament surgery. *Phys Ther*, 1991, **71**, 6, 455-464.
2. Kramer JF, Mendryk SW.— Electrical stimulation as a strength improvement technique: A review. *J Orth Sports Phys Ther*, 1982, **4**, 2, 91-98.
3. Delitto A, Brown M, Strube MJ, et al.— Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: A single subject experiment. *Int J Sports Med*, 1989, **10**, 3, 187-191.
4. Ashley CC, Ridway EB.— On the relationship between membrane potential, calcium transient and tension in single barnacle muscle fibers. *J Physiol*, 1970, **209**, 105-30.
5. Dumoulin J, De Bisschop G.— *Electrothérapie*. 5<sup>me</sup> Edition. Maloine, Paris, 1987, 163-165.
6. Bowman BR & Baker LL.— Effects of waveform parameters on comfort during transcutaneous on muscular electrical stimulation. *Ann Biomed Eng*, 1985, **13**, 59-74.
7. Vanderthommen M, Kelleter B, Crielaard JM.— Les courants excito-moteurs de basses fréquences. Détermination des durées d'impulsions optimales de stimulation. *Ann Kinésithér*, 1991, **18**, 10, 483-484.
8. Vanderthommen M, Kelleter B, Crielaard JM.— Détermination de la fréquence de stimulation produisant la contraction tétonique maximale du quadriceps fémoral, in Pelissier J, Roques CF Ed., *Electrostimulation des nerfs et des muscles*. Masson, Paris, 1992, 33-37.
9. Vanderthommen M, Monfort J, Knoden A, et al.— Les courants excitomoteurs au niveau du quadriceps et des ischio-jambiers. Détermination des conditions fonctionnelles idéales de stimulation. *Kiné 2000*, 1992, **5**, 15.
10. Maier P, Scharf HP, Puhl W.— Elektrostimulation des Musculus quadriceps Wirkung unterschiedlicher Reizstrome. *Z Phys Med Bahn Med Klim*, 1989, **18**, 352-357.
11. Reisman MA.— A comparison of electric stimulators in eliciting muscle contractions. *Phys Ther*, 1984, **64**, 751.
12. Lambert H, De Bisschop F, De Mey G, et al.— Calculation of electric current distribution in tissue. *Eur J Phys Med Rehabil*, 1991, **1**, 126-132.
13. Miller C, Thepaut-Mathieu C.— Comparaison entre entraînement par contraction volontaire et entraînement par contraction électro-induite chez le sportif, in Pelissier J, Roques CF Ed., *Electrostimulation des nerfs et des muscles*. Masson, Paris, 1992, 184-191.
14. Hultman E, Sjöholm H.— Electromyogram, force and relaxation time during and after continuous electrical stimulation of human skeletal muscle in situ. *J Physiol*, 1983, **339**, 33-40.
15. Kramer JF.— Effect of electrical stimulation current frequencies on isometric knee extension torque. *Phys Ther*, 1987, **67**, 1, 31-38.
16. Delitto A, Rose SJ, McKown JM, et al.— Electrical stimulation versus voluntary exercise in strengthening thigh musculature after anterior cruciate ligament surgery. *Phys Ther*, 1988, **68**, 660-663.
17. Vanderthommen M, Constant T, Crielaard JM.— La rééducation du quadriceps: Intérêt de l'électromyostimulation de basse fréquence après arthroscopie du genou. *Kinésithérapie Sci*, 1992, **308**, 21-22.
18. Moritani T, De Vries HA.— Neural factors versus hypertrophy in the time course of strength gain. *Am J Phys Med*, 1979, **58**, 115-130.
19. Duchateau J, De Montigny L, Hainaut K.— Differential effects of training by electrostimulation and by voluntary contractions. *Arch Int Physiol Bioch*, 1988, **96**, P11-P12.
20. Depresseux JC, Cheslet JP, Franck G.— An original method for the concomitant tomographic assessment of cerebral blood flow, oxygen extraction rate, blood volume exchangeable water volume in man. *J Cereb Blood Flow Metab*, 1983, **3**, 152-153.
21. Vanderthommen M, Depresseux JC, Dauchat L, et al.— Spatial distribution of blood flow in electrically stimulated human muscle: a positron emission tomography study. *Muscle Nerve*, 2000, **23**, 482-489.
22. Sjöholm H, Sahlin K, Edström L, et al.— Quantitative estimation of anaerobic and oxidative energy metabolism and contraction characteristics in intact human ske-

- letal muscle in response to electrical stimulation. *Clin Physiol*, 1983, **3**, 227-239.
23. Spriet LL, Söderlund K, Bergström M, et al.— Skeletal muscle glycogenolysis, glycolysis and pH during electrical stimulation in men. *J Appl Physiol*, 1987, **62**, 616-621.
  24. Ren JM, Broberg S, Sahlin, K, et al.— Influence of reduced glycogen level on glycogenolysis during short-term stimulation in man. *Acta Physiol Scand*, 1990, **139**, 467-474.
  25. Meyer RA, Kushmerick MJ, Brown TR.— Application of <sup>31</sup>P NMR spectroscopy to the study of striated muscle metabolism. *Am J Physiol*, 1982, **242**, C1-C11.
  26. Hoult DI, Busby SJ, Gadian DG, et al.— Observation of tissues metabolites using <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance. *Nature*, 1974, **252**, 285-287.
  27. Ackerman JJ, Grove TH, Wong GG, et al.— Mapping of metabolites in whole animals by <sup>31</sup>P NMR using surface coils. *Nature*, 1980, **283**, 167-170.
  28. Chance B, Eleff S, Leigh JS.— Noninvasive, nondestructive approaches to cell bioenergetics. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1980, **77**, 7430-7434.
  29. Sapega AA, Sokolow DP, Graham TJ, et al.— Phosphorus nuclear magnetic resonance: a non-invasive technique for study of muscle bioenergetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 1987, **19**, 410-420.
  30. Vanderthommen M, Gilles R, Carlier P, et al.— Human muscle energetics during voluntary and electrically induced isometric contractions as measured by <sup>31</sup>P NMR spectroscopy. *Int J Sports Med*, 1999, **20**, 279-283.
  31. Hannerz J.— Discharge properties of motor units in relation to recruitment order in voluntary contraction. *Acta Physiol Scand*, 1974, **91**, 374-384.

Les demandes de tirés à part sont à adresser à M. M. Vanderthommen, ISEPK – Bât. B.21, Université de Liège, Sart Tilman, 4000 Liège.