



Modifications de la relation couple-angle et de l'activité électromyographique après entraînement sous électrostimulation

Christian Miller, Chantalle Thépaut-Mathieu

► To cite this version:

Christian Miller, Chantalle Thépaut-Mathieu. Modifications de la relation couple-angle et de l'activité électromyographique après entraînement sous électrostimulation. Science & motricité: Revue scientifique de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, 1992, 18, pp.3-9. hal-01688124

HAL Id: hal-01688124

<https://insep.hal.science/hal-01688124>

Submitted on 19 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CH. MILLER CH. THEPA UT-MATHIEU CH.

Modifications de la relation couple-angle et de l'activité électromyographique après entraînement sous électrostimulation

Science et motricité, 1992, n° 18, pp. 3-9

Ch. Miller

Unité de
Renforcement musculaire
INSEP
11, avenue du Tremblay
75012 Paris (France)

Ch. Thépaut-Mathieu

Laboratoire de Biomécanique
et Physiologie
INSEP
11, avenue du Tremblay
75012 Paris (France)

Christian Miller a effectué sa recherche doctorale au sein du Laboratoire de Biomécanique et Physiologie de l'INSEP. Ses travaux portent sur l'optimisation de l'application de différents procédés de renforcement musculaire, en particulier de l'électrostimulation.

Chantal Thépaut-Mathieu, enseignant-chercheur dans ce laboratoire, consacre ses activités de recherche à l'analyse des mécanismes physiologiques d'adaptation à l'entraînement dans le domaine du renforcement musculaire.

Résumé (Science et motricité, 1992, n° 18).

Les effets respectifs de deux modalités d'entraînement isométrique monoangulaire sont comparés: électrostimulation (ES) versus contraction volontaire (GV). Des augmentations significatives de la force maximale volontaire isométrique sont observées après ES comme après GV. En outre, dans les deux cas, l'amélioration de la force se révèle spécifique de l'angle "entraîné". Les données électromyographiques montrent qu'une adaptation d'ordre neurophysiologique impliquant une meilleure activation du pool de motoneurones des agonistes est à l'origine des gains de force observés. Ce mécanisme semble être régulé par l'intensité du couple externe exercé sur l'ergomètre, quel que soit le mode de déclenchement de la contraction. Le rôle déterminant que pourrait jouer les muscles posturaux dans le processus d'amélioration de la force est ici suggéré.

Mots-clés: Électrostimulation / Entraînement / Renforcement musculaire / Spécificité angulaire / Electromyographie / Adaptations physiologiques.C

La stimulation électrique du muscle squelettique (ES) a été envisagée ces dernières années comme moyen de renforcement musculaire. De nombreux travaux de terrain et de laboratoire ont été entrepris, pour déterminer le bénéfice réel qu'il fallait attendre de ce mode d'entraînement. La plupart des études récentes chez l'homme montrent qu'il est possible d'obtenir des gains de force par électrostimulation. Des résultats encourageants ont été aussi obtenus chez les sujets en cours de rééducation fonctionnelle (Godfrey, Jayawardena et coll., 1979; Williams, Morrissey et Brewster, 1986). Cependant, cette technique de renforcement musculaire reste d'utilisation assez lourde et perturbée par le déclenchement de phénomènes douloureux. Face à ces inconvénients, la pertinence de l'emploi de ce moyen de renforcement musculaire pose problème. La justification de l'emploi de cette technique peut être défendue si elle apporte des avantages particuliers quand elle est comparée aux résultats obtenus par les techniques de renforcement musculaire imposant des contractions volontaires (CV). Nous avons quelques exemples de travaux proposant des comparaisons de l'amplitude des gains de force obtenus après des entraînements sous ES ou par CV (tableau 1). Les bilans

sont plutôt en faveur de l'entraînement par CV, avec seulement deux publications (Laughman, Youdas *et coll.*, 1983; Nobbs et Rhodes, 1986) qui démontreraient un avantage à l'entraînement par ES. Toutefois, l'entraînement par ES présenterait tout de même un avantage par rapport à un entraînement par CV, si les charges imposées dans ce cas de l'ES pouvaient être moins élevées: autrement dit, le rendement (gain / force développée à l'entraînement) deviendrait plus favorable à l'entraînement par ES. Les quelques résultats expérimentaux pour lesquels il nous a été possible d'évaluer ces rendements nous montrent une équivalence dans ces rendements. Plus précisément, si des sujets entraînés par CV, suivent scrupuleusement le même programme d'entraînement qu'un groupe entraîné par ES, y compris les niveaux de force, les gains pour les deux groupes sont identiques (Miller et Thépaut-Mathieu, 1990).

Une comparaison d'ordre quantitative ne nous amène donc pas à retenir un avantage particulier à l'entraînement par ES. Il apparaît donc nécessaire, pour reconnaître un intérêt dans l'utilisation de cette technique de renforcement musculaire, de savoir si les mécanismes d'adaptation déclenchés sous ES sont différents de ceux liés à l'entraînement par CV. Notons que des gains de force (y compris d'amplitudes identiques) peuvent être l'expression de mécanismes d'adaptation différents dont il peut être intéressant de provoquer l'apparition. L'emploi de l'ES pourrait notamment se révéler particulièrement opportun si les adaptations neuromusculaires obtenues dans ce cas permettraient une préparation physique du sportif encore mieux adaptée à certaines disciplines sportives qui exigent par exemple une grande puissance musculaire ou une capacité énergétique importante. Une comparaison ES/CV de type qualitatif ayant pour objet d'identifier pour chacun des deux types d'entraînement les modifications physiologiques déclenchées nous semble donc nécessaire.

Adaptations physiologiques à l'entraînement

D'une manière générale en CV, les mécanismes physiologiques d'adaptation peuvent siéger soit au

niveau du muscle lui-même, soit au niveau de sa commande. Lorsque l'entraînement est réalisé par CV, tout se passe comme si l'adaptation de la commande musculaire constitue un préalable (Moritani et De Vries, 1979). Ce n'est que dans un second temps qu'une adaptation du muscle prendrait progressivement place (notamment sous forme d'une hypertrophie) pour devenir le facteur dominant d'accroissement de la force (Sale, 1988).

L'ES étant supposée solliciter le système neuromusculaire directement à sa périphérie, il semble raisonnable d'attendre une adaptation immédiate du muscle lui-même. Cependant, l'éventualité d'une modification dans l'organisation de la commande après un entraînement sous ES doit être envisagée car elle est étayée par un certain nombre d'arguments.

En effet, Taylor, Kotz et Lavoie (1978), puis Eriksson, Haggmark *et coll.* (1981) obtiennent des gains de force significatifs avec l'ES, sans qu'il soit possible d'y associer des transformations métaboliques significatives des muscles stimulés. L'hypothèse d'une adaptation d'ordre neurophysiologique affectant la commande des muscles stimulés est ici suggérée par ces auteurs. Ces résultats peuvent apparaître comme paradoxaux si on considère qu'en agissant directement sur le muscle, la stimulation électrique se substitue, au moins en partie, à la mise en jeu du versant efférent de la commande motrice. Mais il faut souligner que le versant sensitif se trouve, lui aussi, particulièrement sollicité. Localement, dans la zone de stimulation, le champ électrique est à même de déclencher des réflexes d'origine somesthésique, voire douloureuse. De plus, les contractions électro-induites sont susceptibles d'engendrer, par les forces qu'elles produisent, une perturbation du support postural spécifique dans lequel le sujet est électrostimulé, donc d'être à l'origine du déclenchement de réflexes régulateurs du maintien postural.

Ainsi, les facteurs neurophysiologiques qui contribuent à organiser la commande motrice entre plusieurs groupes fonctionnels seraient impliqués par la stimulation électrique. La répétition d'une telle sollicitation, à travers un processus d'entraînement pourrait conduire à une restructuration des synergies entre ces différents groupes musculaires.

Nous nous sommes proposés de comparer les mécanismes d'adaptation déclenchés par un entraîne-

ment en ES et CV, dans la période initiale du renforcement musculaire. La méthodologie de comparaison est celle proposée par Thépaut-Mathieu, Van Hoecke et Maton (1988). Il s'agit d'étudier les variations de la relation force-longueur (ou couple-angle) après un entraînement isométrique mono-angulaire (ce qui est le cas des entraînements sous ES). Ces auteurs montrent que ce type d'entraînement, lorsqu'il est réalisé par CV, engendre un gain de force particulièrement important à l'angle articulaire entraîné, et moindre, voire nul, aux positions articulaires non entraînées.

Plusieurs mécanismes d'adaptation physiologique peuvent rendre compte de ce phénomène:

- soit un mécanisme d'ordre proprement musculaire, qualifié de *mécanique*. Il s'agirait d'un ajustement du muscle à sa longueur d'entraînement comparable à ce qui a pu être décrit (Tardieu G., Tardieu J.C. *et coll.*, 1973) chez l'animal immobilisé plâtré. Par une variation du nombre de sarcomères, le degré de recouvrement des filaments d'actine et de myosine se trouverait optimisé à sa longueur d'entraînement.

- soit un mécanisme d'adaptation lié à la commande musculaire dit *d'ordre neurophysiologique* qui résulterait de modifications dans l'organisation de la coordination entre les différents groupes musculaires impliqués. Thépaut-Mathieu, Van Hoecke et Maton (1988) ont pu montrer, par le biais d'une analyse électromyographique, que les phénomènes les plus déterminants quant aux gains de force spécifiques obtenus restent des facteurs de cet ordre.

Un troisième mécanisme d'adaptation proprement musculaire, dit *métabolique* ne peut être évoqué que si l'entraînement se traduit par un gain de performance uniforme sur l'ensemble des conditions angulaires testées. En effet, un changement métabolique ou histochimique d'un ensemble de fibres musculaires se manifesterait quelle que soit la longueur à laquelle la fibre est entraînée et, a fortiori, testée.

Le travail que nous avons réalisé se situe dans ce contexte: les effets de l'entraînement ont été analysés sur la base de l'étude des variations de la relation couple-angle d'une part, et des modifications du niveau d'excitation musculaire d'autre part, lors d'efforts isométriques de flexion du coude.

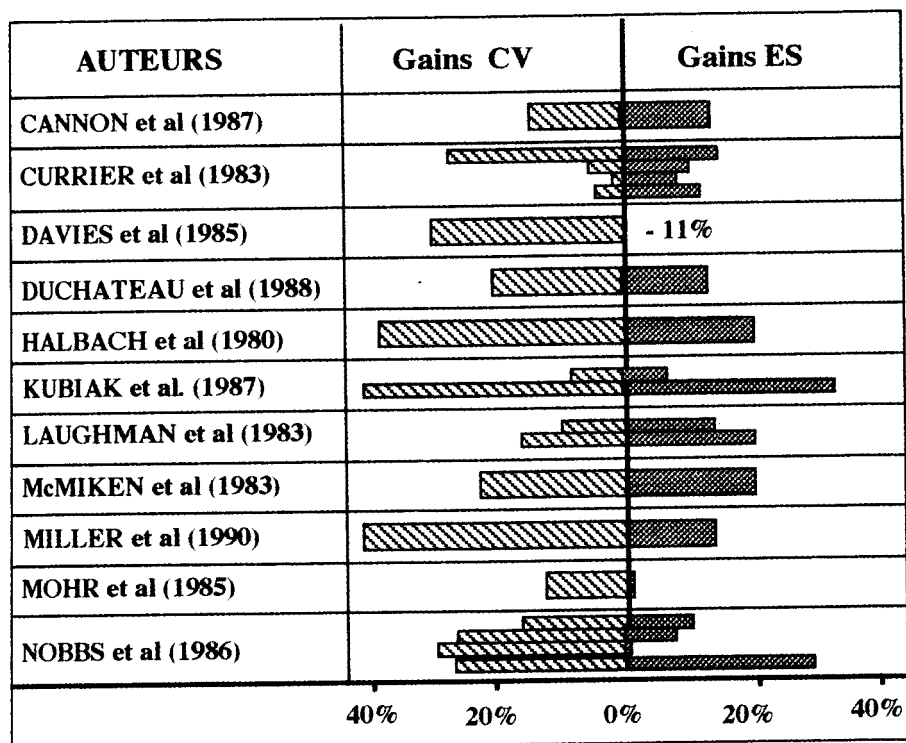


Tableau 1 - Comparaison des gains de force induits par un entraînement par contraction volontaire (CV) ou sous électrostimulation (ES). Les gains sont exprimés en % des valeurs de force maximale pré-entraînement

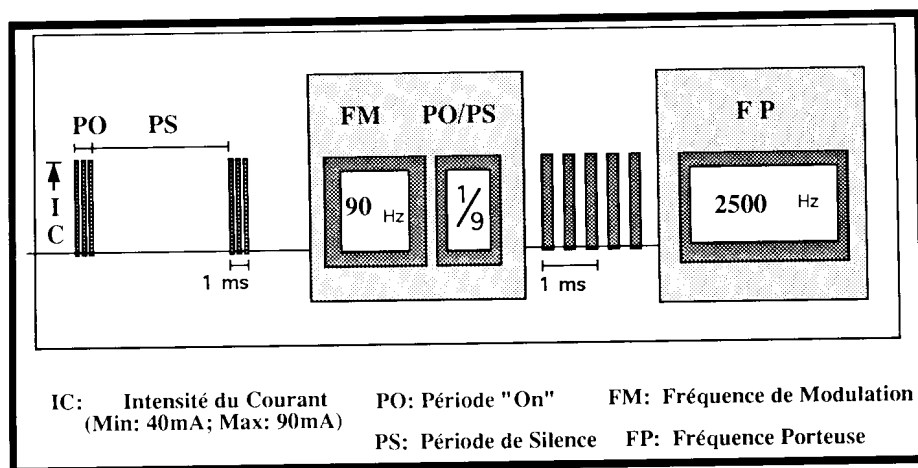


Figure 1 - Stimulus électrique.

triques à 80 % de la force maximale du jour, à l'angle de 25° de flexion du coude (position ouverte de cette articulation). Chaque effort dure cinq secondes et est répété au cours de la série à une fréquence de trois par minute. Un repos de deux minutes est ménagé entre les séries. Sous ES, l'intensité de l'effort ne peut être fixée à l'avance, elle dépend de la tolérance de chaque sujet au stimulus électrique. Nous avons choisi comme stimulus un courant monophasique (figure 1) délivré sous la forme d'un train d'impulsions, d'une fréquence porteuse (FP) de 2500 Hz. Chaque train est formé de trois impulsions rectangulaires et apparaît à une fréquence de modulation de 90 Hz (FM). Les électrodes de stimulation sont placées sur le biceps brachial. Pendant les stimulations, l'articulation est maintenue à un angle de 25° de flexion. Les autres paramètres du programme sont en tous points similaires à ceux proposés au groupe cv.

Tests

Chaque groupe subit, à six semaines d'intervalle, des tests au cours desquels sont mesurés les couples maximaux de flexion du coude, à trois angles de cette articulation: 25°, 80° et 120° (0° correspond à l'extension complète).

À l'occasion de ces efforts volontaires maximaux et pour des niveaux d'efforts sous-maximaux (20 à 80 % de la FMV), l'activité myoélectrique de deux des principaux agonistes (biceps brachial et brachio-radial) et d'un antagoniste (triceps brachial) a été recueillie au moyen d'électrodes de surface. L'activité myoélectrique des muscles explorés a été quantifiée à partir de leur électromyogramme intégré (EMGi). Tests et entraînement se déroulent selon le même dispositif ergométrique (figure 2).

Résultats

Analyse des relations couple-angle

Une analyse de covariance utilisant comme covariable les performances du groupe T met en évidence (figure 3), pour les deux groupes entraînés, une augmentation significative du couple maximal de flexion, dans la position entraînée. Aux deux autres positions angulaires testées mais non-entraînées, l'importance du gain s'atténue selon un gradient décroissant en fonction du degré d'éloignement de la position entraînée.

Protocole

Groupes expérimentaux

Quarante-huit étudiants en éducation physique sont répartis, par tirage au sort, en trois groupes expérimentaux: deux groupes sont entraînés pendant cinq semaines, à raison de trois séances hebdomadaires, l'un en contraction volon-

taire (groupe CV), l'autre sous électrostimulation (groupe ES). Le troisième groupe ne subissant aucun entraînement sert de groupe témoin (groupe T).

Entraînements

Chaque séance d'entraînement en CV comprend la réalisation de cinq séries de cinq efforts isomé-

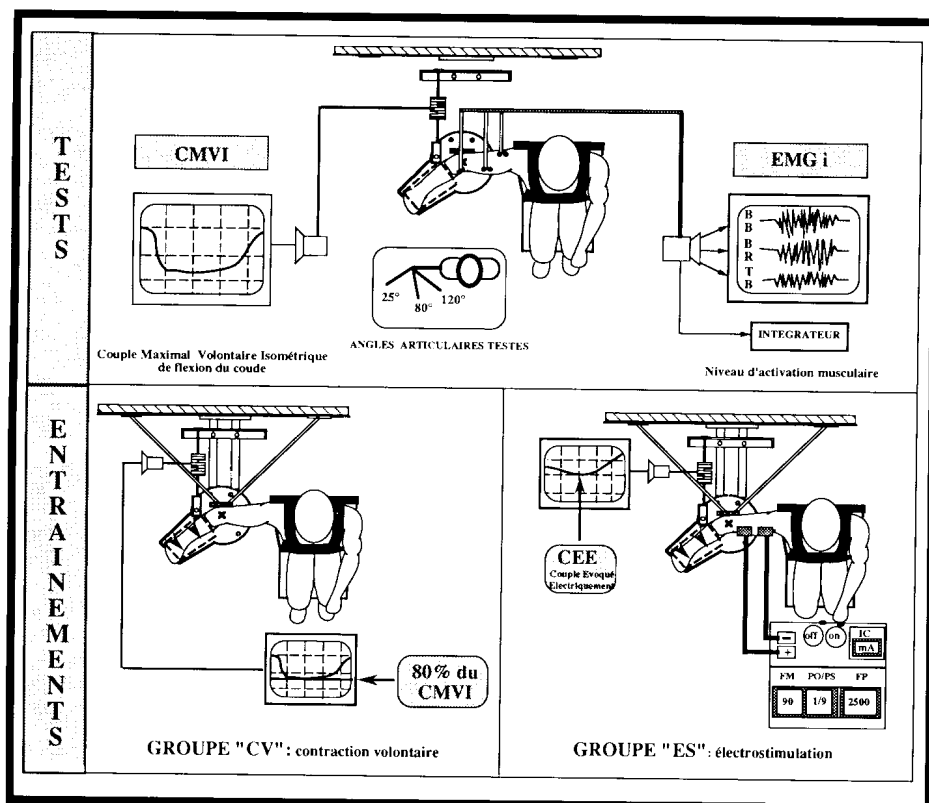


Figure 2 - Dispositif ergométrique.

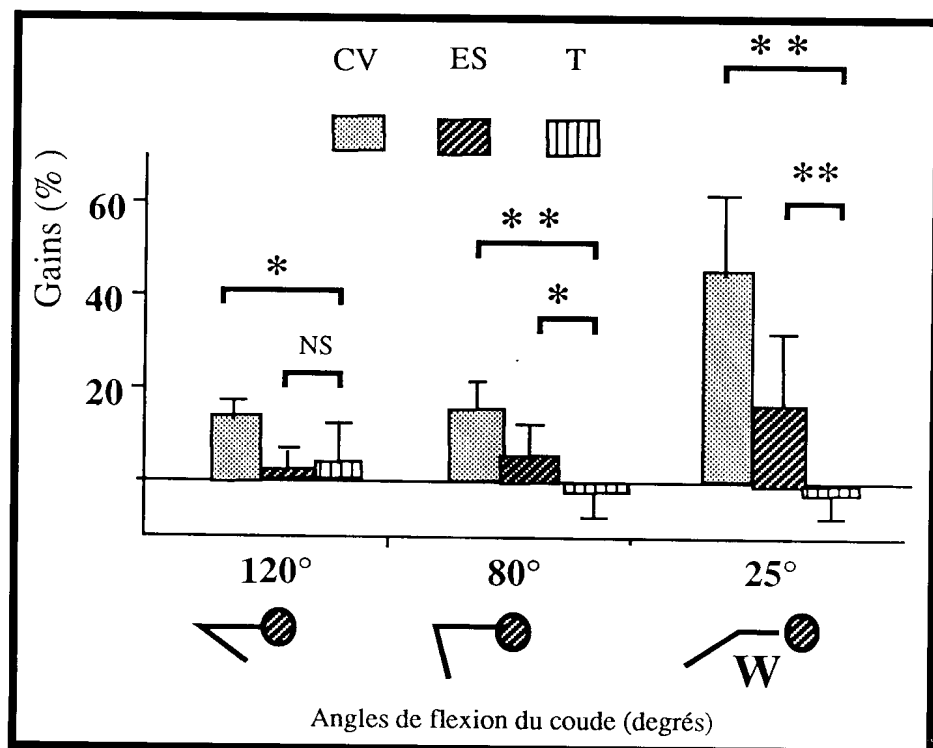


Figure 3 - Diagramme des gains de couples maximaux de flexion exprimés en % des valeurs maximales mesurées aux trois angles avant l'entraînement.

En outre une analyse de covariance entre les groupes ES et CV nous a permis de tester l'existence de différences significatives entre les gains obtenus respectivement pour le groupe CV et pour le groupe ES: cette analyse révèle que les gains sont significativement plus importants pour le groupe CV par rapport au groupe ES, aux trois angles de mesure au seuil $p < 0.01$.

Étude de l'activité électromyographique

Relations $EMGi = f(C)$

Le niveau d'activation d'un muscle en fonction du niveau du couple de flexion exercé a été exprimé par la relation $EMGi = f(C)$. Ces relations ont été établies pour chaque sujet, aux trois angles de flexion du coude (C_{25° , C_{80° et C_{120°). Trois fonctions $EMGi = f(C)$ sont déterminées avant et après entraînement pour chacun des muscles étudiés (Cibiceps brachial, brachio-radial et triceps brachial).

L'ajustement linéaire des fonctions C_f a été trouvé satisfaisant, les coefficients de régression étant compris entre .76 et .97, pour 25 observations par fonction.

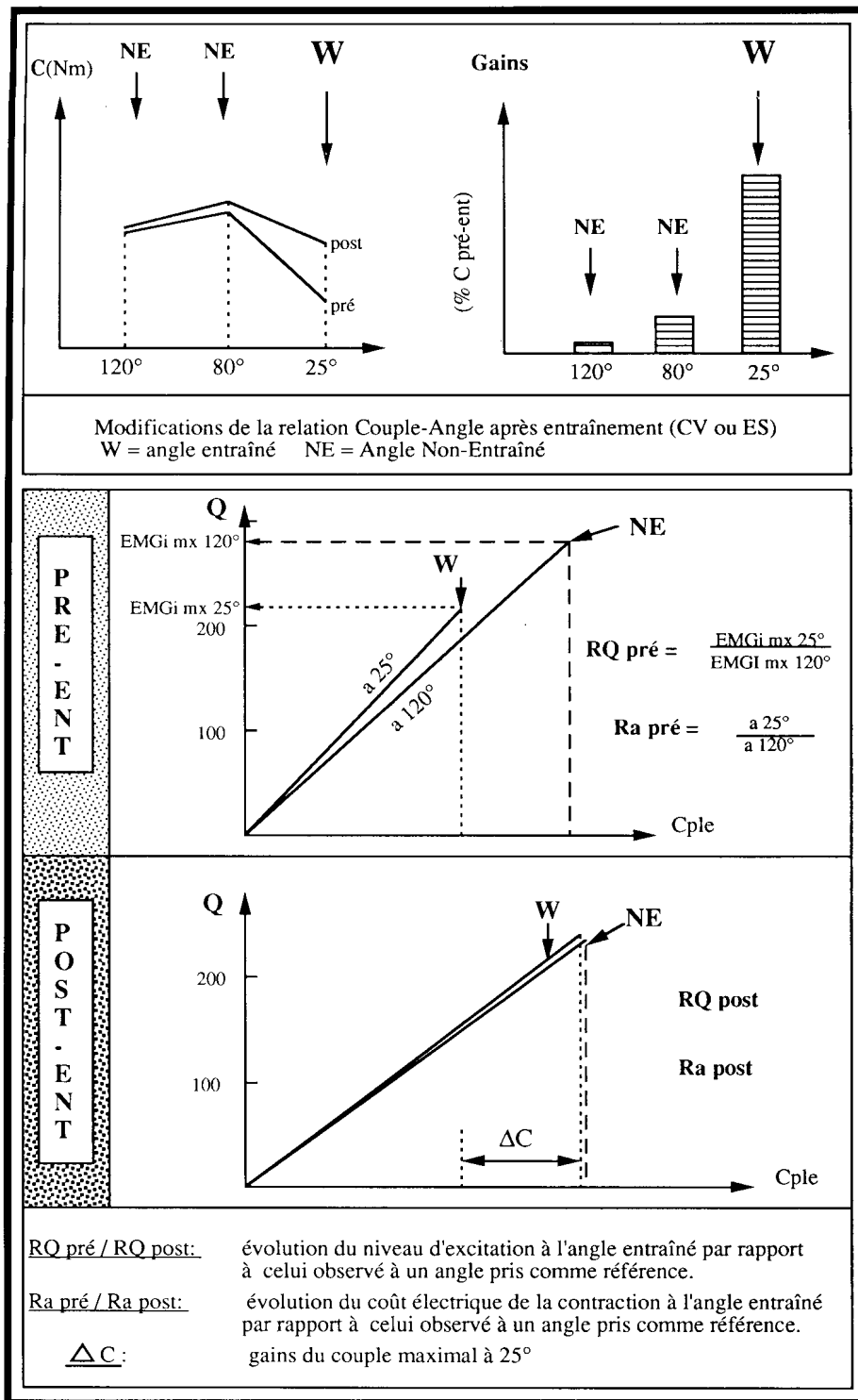
Critères de comparaison

L'effet de l'entraînement sur l'activité électromyographique est étudié en analysant les variations pré-post entraînement des relations $EMGi = f(C)$. A la suite des travaux de Moritani et De Vries (1979), nous avons retenu deux critères pour la comparaison des fonctions $EMGi = f(C)$: la pente de la droite C_a et l'ordonnée maximale observable C_{Qx} . La pente de la droite C_a représente le coût électrique de la contraction et Q_x le niveau d'activité maximale du muscle. Toute augmentation du couple externe maximal obtenue après un entraînement peut ainsi se caractériser par une baisse du

ES: groupe électrostimulé; CV: groupe entraîné par contraction volontaire; T: groupe témoin, non entraîné; W: angle entraîné. L'analyse de covariance intergroupe porte sur les comparaisons du niveau des couples maximaux entre le groupe témoin et les groupes entraînés (CV et ES), à un angle donné. Cette analyse indique:

*: une différence significative au seuil $P < 0.05$.

**: une différence significative au seuil $P < 0.01$.



sur la disparité des gains de force observés selon les conditions angulaires testées (figure 4). Aux angles non entraînés (NE) peu ou pas de gains ont été observés: aussi, les caractéristiques électromyographiques recueillies à ces conditions angulaires sont prises comme références. Les coûts électriques (a) et les niveaux d'activités myoélectriques maximales (EMGi mx) enregistrés à l'angle entraîné (W) sont donc exprimés par rapport aux valeurs obtenues aux angles où les niveaux de force sont restés plus stables (angles non-entraînés). Les comparaisons pré-post entraînement portent non pas sur des valeurs absolues mais sur des valeurs relatives (Ra et RQ sur la figure 4). Comme les termes des rapports sont déduits de données recueillies au cours d'une même séance, donc dans des mêmes conditions d'enregistrement, les inconvénients de la faible reproductibilité du signal électromyographique se trouvent esquivés. Cette comparaison a été menée simultanément sur les agonistes et les antagonistes.

Bilan des variations électromyographiques

La figure 5 montre qu'une augmentation relative du niveau d'activité myoélectrique maximale des deux agonistes explorés accompagne les gains de force à l'angle entraîné, quel que soit le mode d'entraînement considéré (ES ou CV). Cette augmentation est le reflet d'une sollicitation plus complète de l'ensemble des fibres musculaires des agonistes. Elle affecte les deux agonistes de la flexion. En outre, le niveau d'activité myoélectrique relatif de l'antagoniste est demeuré stable. Pour le groupe CV, uniquement, une diminution relative du "coût myoélectrique de la contraction" apparaît à l'angle entraîné. Ceci traduit une plus grande efficacité du muscle, à un niveau d'excitation donné.

Discussion -conclusion

L'entraînement par ES permet un développement significatif de la force maximale isométrique. Ce gain reste principalement localisé à l'angle entraîné. Cette observation nous incite donc à ne pas retenir un quelconque effet d'ordre métabolique. Une augmentation du niveau d'activation myoélectrique des agonistes associée aux gains de force nous montre l'existence d'une adaptation d'ordre neurophysiologique. Celle-ci est identique au sein des

Figure 4 - Principe de comparaison des données électromyographiques.

coût électrique et/ou par une augmentation du niveau d'activité maximal.

Principe de comparaison

La faible reproductibilité des signaux myoélectriques prélevés, à

quelques jours d'intervalle, chez un même individu nous a conduits à rejeter toute comparaison directe des valeurs EMGi. Les comparaisons ont donc été réalisées selon le principe proposé par Thépaut-Mathieu (1984). Ce principe repose

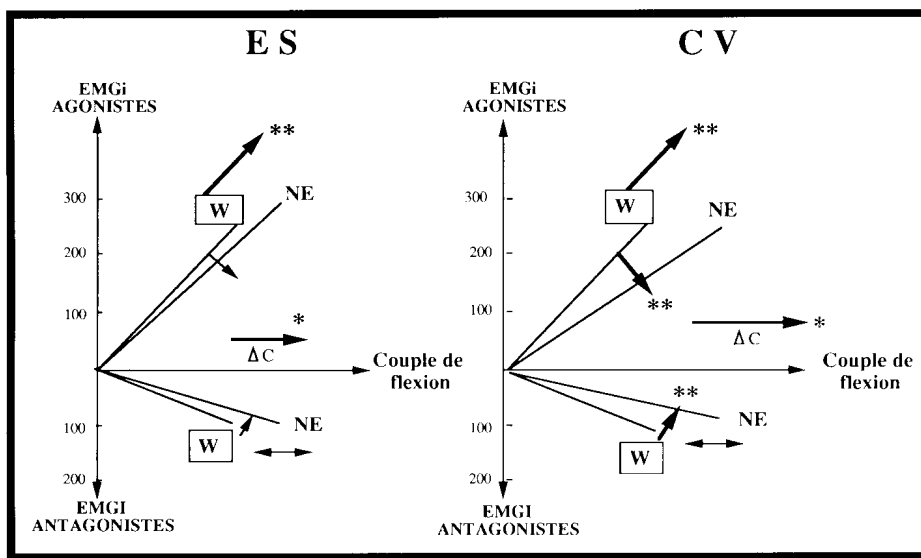


Figure 5 - Variations des relations EMGi-couple entre les conditions pré et post entraînement après une augmentation de 6° du couple de flexion à l'angle d'entraînement. Les flèches indiquent le sens des variations observées entre les données EMGi de l'angle "entraîné" (W) par rapport à un angle "non entraîné" (NE). L'analyse statistique porte:

- sur le niveau d'excitation maximale, soit sur le nombre d'observations où le rapport RQ pré/RQ post a augmenté, comparé au nombre d'observations où ce rapport a diminué.
- sur le coût électrique de la contraction, soit sur le nombre d'observations où le rapport Ra pré/Ra post a diminué, comparé au nombre d'observations où il a augmenté.

Cette analyse indique (**) une différence significative au test de MacNemar au seuil $p < 0.01$.

agonistes étudiés, même si l'électro-stimulation a été appliquée préférentiellement sur l'un d'entre eux (biceps brachial): la synergie musculaire entre agonistes n'apparaît donc pas modifiée. Par contre, on observe un discret remaniement de la synergie agoniste-antagoniste en faveur du groupe agoniste. En effet, à l'angle entraîné, on assiste à une augmentation significative du niveau d'activation maximale des agonistes, alors qu'aucun changement significatif n'est observé sur le triceps brachial antagoniste. Ainsi, lors des efforts maximaux, les agonistes sont proportionnellement plus actifs, après l'entraînement, que les antagonistes. En outre, il est particulièrement remarquable de constater que les modifications des caractéristiques mécaniques (relation couple-angle) et électromyographiques (niveau d'excitation) de la contraction sont similaires en ES et en CV, donc indépendantes du mode de déclenchement de la contraction.

Ces résultats laissent à penser que les mêmes mécanismes physiologiques ont été sollicités: un recrutement plus complet dans les conditions d'entraînement du pool des motoneurones des agonistes. Ceci est bien en accord avec la plus gran-

de excitabilité des motoneurones des agonistes, remarquée après entraînement, par Sale, McDougall et coll. (1983). Ces diverses observations peuvent être considérées comme l'indice d'un changement de l'état de polarisation des motoneurones. Une réduction des influx inhibiteurs a été évoquée par Komi, Viitasalo et coll. (1978) pour rendre compte de ce phénomène. D'un point de vue fondamental, l'existence d'une adaptation neurophysiologique après un entraînement sous électrostimulation, où le versant moteur de la commande motrice a peu été sollicité, témoigne du rôle primordial joué par les informations musculaires, articulaires et cutanées dans la réorganisation de la commande motrice.

Nous pouvons y distinguer deux niveaux:

- **local**: ce sont les informations provenant du membre mobilisé, plus précisément des structures directement impliquées par la contraction imposée pendant l'entraînement. Ces informations sont, par rapport à la contraction volontaire, très perturbées sous ES.

- **général**: ce sont les informations qui contribuent à définir l'état postural du sujet dans son ensemble et permettent ainsi, par régulation

d'origine réflexologique, un maintien de l'équilibre postural. Ce dernier se trouve perturbé si le sujet exerce une force sur le milieu extérieur. Cette perturbation est indépendante du mode de déclenchement de la contraction (ES ou CV): c'est ce déséquilibre d'ordre mécanique qui serait l'agent déclencheur du réajustement postural.

La question est de savoir quelles sont les informations qui prévalent dans la mise en jeu des mécanismes d'adaptation à l'entraînement: est-ce prioritairement les informations en provenance des structures directement stimulées, ou celles liées aux conditions posturales?

Le fait que nous observons des modifications similaires du niveau d'excitation musculaire quel que soit le mode d'entraînement nous laisse penser que nous sommes en présence, dans les deux cas, d'un stimulus de même nature: le déséquilibre postural provoqué par les forces exercées par le sujet sur le milieu extérieur. Forces dont il a pu être montré qu'elles doivent atteindre en ES comme en CV (Miller et Thépaut-Mathieu, 1990) un seuil minimum de 33 % de la FMVI pour espérer être efficaces. L'adaptation pendant l'entraînement par CV aux contingences posturales a été soulignée par Rasch et Morehouse (1957). Elle apparaît aussi se produire lors d'entraînement par ES. C'est sans doute l'origine principale des gains de force obtenus sous ES, dans le cadre de notre entraînement.

Il faut cependant noter que ce n'est pas la seule adaptation qui puisse être évoquée lors des entraînements par contraction volontaire: des gains significatifs observés aux angles non entraînés (figure 3) témoignent qu'une adaptation d'ordre métabolique a pu prendre place avec cet entraînement. Paradoxalement, aucun signe susceptible de révéler une adaptation de cet ordre n'a pu être décelé après un entraînement sous ES. Les adaptations neurophysiologiques se montrent donc incontournables, même à l'occasion d'entraînement sous ES. Ainsi, bien que la contraction soit déclenchée de manière artificielle et involontaire, c'est avant tout la commande musculaire qui se trouve modifiée dans cette phase initiale de l'entraînement. Cette prédominance des phénomènes neurophysiologiques met au second plan l'intérêt qu'on pourrait attribuer pour l'ES qui, sollicitant le système neuromusculaire de manière non-physiologique, serait à même d'induire des adaptations spécifiques. Cette supposition se fondait sur les

perturbations des modalités de recrutement des fibres musculaires observées par Garnett et Stephens (1981): les fibres musculaires appartenant à des unités motrices à "haut seuil" - donc difficilement touchées par l'entraînement en CV - deviendraient plus facilement recrutées sous ES. Il faut cependant souligner que ces observations ont été menées sous des stimulations de très faible intensité: on peut se demander si cette observation implique des conséquences

notables dans les effets d'un entraînement par ES pratiqué sous stimulation maximale. L'idée d'une adaptation physiologique qualitativement différente sous ES aurait pu laisser espérer un intérêt particulier à cette méthodologie d'entraînement. Ceci ne se vérifie pas, tout du moins dans le cadre d'un entraînement de quelques semaines.

D'un point de vue pratique, nos résultats permettent de situer l'importance et la nature des gains

que l'on peut attendre de l'ES. L'intérêt spécifique de cette technique de renforcement musculaire en vue de l'augmentation de la force maximale chez le sportif reste donc à démontrer, semble-t-il. Par contre, dans le cas où le muscle se trouve entravé dans son fonctionnement normal, la technique d'ES, de part l'identité des modes d'adaptations qu'elle déclenche, par rapport à la CV, pourrait constituer un palliatif intéressant au manque d'activité musculaire.

Bibliographie

- ATHA (J.). - Strengthening muscle. *Ex. Sports Sei. Rev.*, 1981, 9: 1-73.
- CABRIC (M.), APPEL (H.J.). - Effect of electrical stimulation of high and low frequency on maximum isometric force and some morphological characteristics in men. *Int. J. Sports Med.*, 1987, 8: 256-260.
- CANNON (R.J.), CAFARELLI (E.). - Neuromuscular adaptation to training. *J. Appl. Physiol.*, 1987, 63, 6: 2396-2402.
- CURRIER (D.P.), MANN (R.). - Muscular strength development electrical stimulation in healthy individuals. *Phys. Ther.*, 1983, 63, 6: 915-921.
- DAVIES (C.T.M.), DOOLEY (P.), McDONAGH (M.J.N.), WHITE (M.J.). - Adaptation of mechanical properties of muscle to high force training in man. *J. Physiol.*, 1985, 365: 277-284.
- DUCHATEAU (J.), HAINAUT (K.). - Training effects of sub-maximal electrostimulation in a human muscle. *Med. Sei. Sports Exerc.*, 1988, 20, 1: 99-104.
- ERIKSSON (E.), HAGGMARK (T.), KIESSLING (K.H.), KARLSSON (J.). - Effect of electrical stimulation on human skeletal muscle. *Int. J. Sports Med.*, 1981, 2, 1: 18-22.
- GARNETT (R.), STEPHENS (JA) - Changes in the recruitment threshold of motor units produced by cutaneous stimulation in man. *J. Physiol.*, 1981, 311: 463-473.
- GODFREY (C.M.), JAYAWARDENA (H.), QUANCE (TA), WELSH (P.). - Comparison of electro-stimulation and isometric exercise in strengthening the quadriceps muscle. *Physiother. Can.*, 1979, 31, 5: 265-267.
- HALBACH (J.w.), DON STRAUSS (ATC.). - Comparison of electro-myostimulation to isokinetic training in increasing power of the knee extensor mechanism. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1980, 2, 1: 20-24.
- KOMI (P.V.), VIITASALO (J.H.T.), RAURAMAA (R.), VIHKO (V.). - Effect of isometric strength training on mechanical, electrical and metabolic aspects of muscle functions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1978, 40: 45-55.
- KUBIAK (R.J.), WHITMAN (K.M.), JOHNSTON (R.M.). - Changes in quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise versus electrical stimulation. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1987, 8, 11: 537-541.
- LAUGHMAN (R.K.), YODAS (J.w.), GARRET (TR.), CHAO (EYS.). - Strength changes in the normal quadriceps femoris muscle as a result of electrical stimulation. *Phys. Ther.*, 1983, 63, 4: 494-499.
- MAC MIKEN (OF), TODD-SMITH (M.), THOMPSON (C.). - Strengthening of human quadriceps muscles by cutaneous electrical stimulation. *Scand. J. Med.*, 1983, 15: 25-28.
- MILLER (Ch.), THÉPAUT-MATHIEU (Ch.). - Facteurs conditionnant l'efficacité de l'entraînement par électrostimulation. *Cinésiologie*, 1990, XXIX: 147-155.
- MILLER (Ch.), THÉPAUT-MATHIEU (Ch.). - Comparaison d'entraînements effectués sous électrostimulation et par contraction volontaire: rendement et adaptations physiologiques *Science et Motricité*, 1990, 12: 16-27.
- MORH (T), CARLSON (B.), SULENTIC (C.), LANDRY (R.). - Comparison of isometric exercise and high volt galvanic stimulation on quadriceps femoris muscle strength. *Phys. Ther.*, 1985, 65, 5: 606-612.
- MORITANI (T), De VRIES (HA). - Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle gain. *Am. J. Phys. Med.*, 1979, 58, 3: 115-130.
- NOBBS (LA), RHODES (E.C.). - The effect of electrical stimulation and isokinetic exercise on muscular power of the quadriceps femoris. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1986, 8, 5: 260-268.
- RASCH (P.J.), MOREHOUSE (L.E.). - Effects of static and dynamic exercise on muscular strength and hypertrophy. *J. Appl. Physiol.*, 1957, 11: 29-34.
- SALE (D.G.), McDOUGALL (O.), UPTON (AR.M.), McCOMAS (AJ.). - Effect of strength training upon motoneuron excitability in man. *Med. Sei. Sports Exerc.*, 1983, 15, 1: 57-62.
- SALE (D.G.). - Neural adaptation to resistance exercise. *Med. Sei. Sports Exerc.*, 1988, 20: S135-S145.
- SELKOWITZ (D.M.). - Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation. *Phys. Ther.*, 1985, 65, 2: 186-196.
- TAYLOR (A.W.), KOTZ (YM.), LAVOIE (M.). - The effects of faradic stimulation on skeletal muscle fibre area. *Cano J. Appl. Sport Sei.* (abstr.), 1978, 3: 185.
- THÉPAUT-MATHIEU (Ch.). - Modification de la force musculaire et de l'activité des motoneurones au cours d'un entraînement isométrique chez l'homme. Thèse 3e cycle., 1984, Université PARIS VI, 1 Vol: 90 p.
- THÉPAUT-MATHIEU (Ch.), VAN HOECKE (J.), MATON (B.). - Myoelectrical and mechanical changes linked to length specificity during isometric training. *J. Appl. Physiol.*, 1988, 64: 1500-1505.
- TARDIEU (G.), TARDIEU (C.), MONFRAIX (C.), GAGNARD (L.), LOMBARD (M.). - L'ajustement du nombre des sarcomères de la fibre musculaire à la longueur qui lui est imposée. *Rev. Neural. (Paris)*, 1973, 129, 1: 21-49.
- WILLIAMS (R.A), MORRISSEY (M.C.), BREWSTER (C.E.). - The effect of electrical stimulation on quadriceps strength and thigh circumference in miscectomy patients. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 1986, 8, 3: 143-146.