

RÉSUMÉ

L'utilisation de l'électrostimulation (ES) comme méthode de développement de la force est un sujet très controversé. Certains auteurs pensent qu'elle constitue une alternative parfaite au travail volontaire, tandis que d'autres préfèrent limiter son utilisation à son application thérapeutique sur le muscle dégénéré. La revue des travaux ayant utilisé l'ES chez l'individu sain dans un but d'entraînement montre une amélioration de la force maximale volontaire dans 85% des études. Les mécanismes sous-jacents semblent être les mêmes que l'entraînement utilisant des contractions volontaires, à savoir une amélioration des facteurs nerveux et une hypertrophie des fibres musculaires. Si l'on compare l'ES aux méthodes traditionnelles de développement de la force, il semble qu'elle provoque des gains de force similaires, mais rarement supérieurs. En revanche, un programme d'entraînement combinant l'ES avec n'importe quel type de contraction volontaire provoque des gains de force supérieurs à ceux de chaque méthode prise séparément. Ainsi l'ES peut être utilisée avantageusement comme complément aux méthodes classiques d'entraînement de la force.

Mots-clefs : Entraînement - Électrostimulation - Force - Hypertrophie - Facteurs nerveux.

INTRODUCTION

Aujourd'hui l'entraînement sportif nécessite une somme de travail considérable. Les méthodes d'entraînement doivent constamment évoluer afin de provoquer une adaptation de l'organisme qui soit la plus rapide et la plus efficace possible. Le problème majeur n'est plus seulement celui du temps consacré à l'entraînement, mais aussi celui du temps de récupération, de plus en plus restreint en raison du volume et de l'intensité des charges de travail.

Depuis les travaux originaux de Krcka et Zrubak (1970) et Kots et Chwilon (1971) portant sur l'effet de la stimulation électrique dans le développement des qualités musculaires, et dans ce contexte d'optimisation de l'entraînement, ce champ de recherche à la frontière entre la physiothérapie et la physiologie de l'exercice n'a cessé de prendre de l'importance.

Parmi les techniques usuelles de musculation, l'électrostimulation (ES) occupe une place très controversée. La littérature médicale foisonne de publications, dont les conclusions face à ce mode de travail sont résolument optimistes, dubitatives, voire négatives (Gobelet, 1990). Relativement peu d'études se sont intéressées à son utilisation chez l'individu sain, dans un but d'amélioration de la performance. Toutefois, la controverse reste toujours de mise. Pour certains, l'entraînement par ES semble raccourcir à la fois le temps d'entraînement et le temps de récupération et se présente donc comme une alternative intéressante aux exigences contemporaines du sport de haute performance (Cometti, 1988). Pour d'autres, l'ES peut avoir un effet

semblable, mais pas supérieur aux techniques de musculation utilisant la contraction volontaire (Duchateau et Hainaut, 1988).

Enfin, il demeure un certain nombre de chercheurs pour qui l'ES ne provoque pas de gain de force significatifs (Davis et McGrath, 1983 Albright et Yougo, 1985). Cet article cherche à préciser, grâce à une revue des études ayant utilisé l'ES chez l'individu sain en vue d'améliorer la performance musculaire, si l'ES a sa place dans les moyens de développement de la force, ou si son utilité se limite à son application thérapeutique.

EFFETS SUR LA FORCE

La force maximale volontaire (FMV) est la force la plus élevée que le système neuromusculaire est en mesure de produire lors d'une contraction musculaire volontaire (Manno, 1992). La première publication ayant étudié l'effet de la stimulation électrique sur la FMV d'un muscle sain dans le cadre d'un entraînement orienté vers la performance sportive est due à Krcka et Zrubak (1970). Ils ont stimulé le biceps brachial et le triceps sural de 36 sujets avec un courant faradique de 200 Hz. Après un entraînement d'une durée totale de 6000s ils ont observé une augmentation significative de la force musculaire des deux muscles (45.80 % et 61.50 % respectivement).

L'étude qui a servi et qui sert encore de référence dans ce champ de recherche est celle qu'ont publié Kots et Chwilon en 1971. Au moyen d'un stimulateur générant des impulsions rectangulaires de 50 Hz, ils ont entraîné le biceps brachial et les mollets de jeunes lutteurs. Quatre groupes ont été formés, le temps total de stimulation allant de 900s à 1900s (tableau 1). Les résultats montrent une augmentation significative de la force de 27 % (groupe 1) à 56 % (groupe 2).

Les études subséquentes, à quelques exceptions près (Davis et McGrath, 1983; Owens et Malone, 1985 ; Mohr et coll., 1985) ont confirmé que l'on pouvait induire un gain de force avec les différentes techniques d'ES. Elles ont toutefois rapporté des gains plus modestes. En effet, sur l'ensemble des études répertoriées dans le tableau 1, 80 % d'entre elles ont rapporté des gains de force inférieurs à ceux observés par Krcka et Zrubak (1970) et Kots et Chwilon (1971), la grande majorité (66.6 %) rapportant des gains inférieurs à 30 % de la FMV

L'hétérogénéité des résultats obtenus reflète celle des moyens utilisés. Comme nous pourrions le constater ultérieurement, la méthodologie utilisée dans les différentes études les rend difficilement comparables.

Stéfanovska et Vodovnik (1985), après avoir entraîné le quadriceps de dix sujets selon un protocole identique, ont observé des gains de force de 25.3 % lorsque des impulsions rectangulaires monophasiques de basse fréquence (25 Hz) étaient utilisées, et de 13.2 % avec des impulsions sinusoïdales de 2500 Hz modulées à 25 Hz. Or comme nous pouvons le constater dans le tableau 1, la forme des impulsions et la fréquence du courant sont des paramètres qui varient beaucoup d'une étude à l'autre. Un autre point capital dans l'amélioration de la force est l'intensité relative atteinte pendant l'entraînement. Or dans la majorité des cas les auteurs ne spécifient

pas l'intensité qu'ils utilisent, ou bien ils entraînent les sujets à des pourcentages différents de la force maximale volontaire isométrique (FMVI). Ils peuvent aller de 33 % (Laughman et coll., 1983) à 100 % (Nobbs et coll., 1983) en passant par toutes les intensités intermédiaires (> 60 % pour Currier et Mann, 1983; < 80 % pour McMicken et coll., 1983). Malgré ces différences, la littérature concernant le muscle sain chez l'homme suggère un gain de force dans 85 % des études répertoriées, alors que seulement 15 % d'entre elles ne rapportent aucun effet de l'ES sur la force maximale volontaire. Par delà les divergences méthodologiques, il semble donc que l'ES provoque une amélioration de la FMV.

MÉCANISMES SOUS-JACENTS AUX ADAPTATIONS

Il est généralement considéré que l'augmentation de la force se fait selon deux types de mécanismes, selon qu'ils impliquent des facteurs structuraux (hypertrophie) ou nerveux (coordination inter et intramusculaire, recrutement des unités motrices) (Fukunaga, 1976, dans Cometti, 1988)

L'hypertrophie musculaire

Peu d'auteurs ont mesuré la masse musculaire avant et après un entraînement par ES (tableau 2). A nouveau les résultats obtenus sont contradictoires.

Eriksson et coll. (1981) n'ont pas observé d'hypertrophie du quadriceps crural après 15 séances de stimulation, et cela malgré un accroissement substantiel de la force maximale isométrique et dynamique. Roméro et coll. (1982) n'ont pas observé de modification significative de la masse musculaire après un entraînement du quadriceps par ES, tout comme Currier et coll. (1983), alors qu'ils ont observé chacun un gain de force de l'ordre de 207c.

A l'inverse, Cometti (1988), après avoir entraîné le quadriceps de la jambe dominante de huit sauteurs au moyen d'un courant rectangulaire modulé (2 500Hz - 50 Hz) a observé une augmentation du tour de cuisse de 2 à 5 cm, conjointement à un gain de force de 13 à 16 %.

De tels résultats avaient déjà été rapportés par les études originales de Krcka et Zrubak (1970) et Kots et Chwilon (1971). Les premiers ont observé une hypertrophie de 10.8 % pour le biceps brachial et 9.9 % pour le triceps sural, ce pour un gain de force de 45.8 et 61.5 % respectivement, tandis que les seconds ont pu mesurer une hypertrophie de 3.9 % du biceps brachial, avec un gain de force de 27 à 38 %, selon la condition expérimentale.

A la lumière de ces études, force est de constater qu'aucune tendance ne semble clairement prendre l'ascendant sur l'autre. A peu près la moitié des études répertoriées dans le tableau 2 ne rapporte aucun effet structural de l'entraînement par ES sur le muscle, alors que l'autre moitié observe une hypertrophie parallèlement à un gain de force significatif.

Toutefois la plupart des travaux utilisent des techniques d'évaluation de l'hypertrophie éminemment critiquables, basées la plupart du temps sur la mesure de la circonférence des muscles entraînés. Ainsi il est à noter que les études qui ont mesuré la surface des fibres pour évaluer l'hypertrophie (Taylor et coll., 1978 Eriksson et coll., 1981 ; StPierre et coll., 1986) n'ont observé aucune modification significative due à l'ES, alors qu'ils rapportent des gains de force significatifs (Eriksson et coll., 1981).

Outre cet aspect, nous pouvons remarquer que la plupart des études se déroulent sur une période de cinq semaines, à raison de trois sessions en moyenne par semaine. On considère généralement qu'une telle durée est trop courte pour qu'il y ait des adaptations morphologiques (Hakkinen, 1985). Aucune étude ne s'est réellement intéressée aux effets de l'ES à long terme afin de vérifier la dynamique des adaptations avec le temps. S'il manque encore certaines données à ce sujet, certaines évidences tendent à montrer que l'obtention d'une hypertrophie avec un entraînement par ES est possible. Casperson (1950) a observé que 'les modifications de l'activité de la cellule responsables de l'hypertrophie semblaient consister en une augmentation de la taille des noyaux et de leur activité de synthèse des protéines. Or Cabric et coll. (1988), après avoir entraîné le triceps sural de six sujets au moyen d'un courant sinusoïdal de 2500 (50) Hz, ont observé les mêmes modifications cellulaires que Casperson (1950), conjointement à une augmentation de la circonférence du mollet de 2.90 cm. Il eut été intéressant de mesurer plutôt la surface des fibres du muscle entraîné. Toutefois ces données suggèrent que l'ES peut activer les mécanismes moléculaires responsables de l'hypertrophie.

L'adaptation neuromusculaire

L'adaptation fonctionnelle du muscle squelettique humain au cours de l'exercice volontaire est largement documentée (pour une revue, voir McDonagh et Davies, 1983, ou encore Enoka, 1988). Parmi ces processus d'adaptation, l'importance des facteurs nerveux a été avancée par de nombreux auteurs, particulièrement chez le débutant (Fukunaga, 1976; Moritani et DeVries, 1979; pour un exposé détaillé: Cometti, 1988 ; Enoka, 1988).

Trois types d'évidences ont permis de suggérer leur rôle dans l'accroissement de la force, quelle que soit la méthode d'entraînement utilisée (volontaire ou par électrostimulation)

- les modifications dans le tracé de l'EMG,
- le gain de force du membre controlatéral non entraîné,
- le gain de force rapide sans hypertrophie.

Plusieurs études ont rapporté des modifications du tracé de l'EMG durant un test de force maximale isométrique, avant et après un entraînement de musculation à base de mouvements volontaires (Hakkinen et Komi, 1983; Hakkinen et coll., 1985 ; Komi et coll., 1988 ; Moritani et DeVries, 1979). Ces modifications ont suggéré une amélioration de la synchronisation spatiale et temporelle dans le recrutement des unités motrices (Enoka, 1988).

Peu d'études s'intéressant à l'entraînement par ES ont utilisé l'EMG pour vérifier ses effets sur le tracé obtenu. Singer (1986) a stimulé les quadriceps atrophiés de quinze patients au moyen d'un courant rectangulaire de basse fréquence (50 Hz). Le protocole a duré quatre semaines, à raison d'une séance par jour, tous les jours. Les EMG étaient enregistrés au cours d'un test de contraction volontaire maximale. Outre une amélioration de la force de 22 % pour la jambe stimulée, et 14 % pour la jambe non stimulée, il rapporte une amélioration de la synchronisation spatiale et temporelle du recrutement des unités motrices, pouvant expliquer le gain observé pour la jambe controlatérale. Ces résultats suggèrent donc qu'un programme de musculation par ES peut provoquer des modifications semblables à celles observées avec un entraînement par des mouvements volontaires.

Un autre témoin de la manifestation de facteurs nerveux pourrait être l'effet controlatéral de l'entraînement par stimulation électrique (Enoka, 1988 ; Portmann, 1991). Le principe d'un tel transfert est que la stimulation d'un segment provoque une

modification du schéma de recrutement des unités motrices de l'autre segment. Ainsi, bien qu'il ne soit pas stimulé directement, on observe une amélioration de la force du segment non stimulé due à une meilleure synchronisation des unités motrices. Si cet aspect a fait l'objet de plusieurs études pour l'entraînement volontaire (Komi et coll., 1978 ; Moritani et DeVries, 1979 ; Yasuda et Miyamura, 1983; Lewis et coll., 1984 ; Parker, 1985 Cannon et Cafarelli, 1987), très peu d'auteurs ont cherché à vérifier cet effet à la suite d'un entraînement par ES. Cabric et Appell (1987) ont trouvé une augmentation de la force des muscles du mollet non stimulé après un cycle d'entraînement par stimulation d'une durée de 21 jours, aussi bien dans le groupe stimulé à 50 Hz que dans celui stimulé à 1000 Hz. Lai et coll. (1988), après avoir observé sur le quadriceps des gains de force de 48.5 % dans le groupe stimulé à 50 % de la FMV et 24.6 % dans celui stimulé à 25 % de la FMV ont constaté des modifications de force significatives du quadriceps non stimulé dans les deux groupes (24.1 % et 18.1 % respectivement). En revanche, Eriksson et coll. (1981) n'ont pas trouvé de modification de force dans le quadriceps de la jambe non stimulée, malgré des gains de force substantiels dans le quadriceps entraîné par ES. Laughman et coll. (1983) ont rapporté des résultats semblables. Il est donc difficile de se faire une opinion objective sur l'effet controlatéral engendré par ES. Peu d'études s'y sont intéressées, et le manque d'information concernant l'intensité relative utilisée les rend difficilement comparables. Seuls Lai et coll. (1988) ont différencié leurs résultats en fonction du % FMV utilisé lors des entraînements. La grande diversité des résultats obtenus pose aussi le problème de la signification et de la précision de la mesure de l'effet controlatéral. Les différences observées peuvent être dues à l'influence des facteurs nerveux comme elles peuvent être dues à celle de contractions parasites involontaires apparaissant lors de la stimulation de l'autre segment. Il manque donc encore des données pour confirmer ou non l'existence d'un tel effet lors d'un entraînement par ES.

Le dernier argument suggérant une adaptation neuromusculaire est lié aux gains de force observés après des périodes d'entraînement trop courtes pour induire une hypertrophie des muscles stimulés (Häkkinen, 1988; Enoka, 1988; Hainaut et Duchateau, 1992).

Eriksson (1981), après avoir entraîné les quadriceps de 19 sujets par ES, a rapporté des gains de force allant de 13 à 18 %, alors que ni la circonférence du muscle ni son activité enzymatique n'ont subi de modifications. Bien que cette étude suggère sans équivoque l'influence des facteurs nerveux dans le gain de force observé, les résultats contradictoires rapportés dans le tableau 2 suggèrent que la réalité est plus complexe. Il est tout de même possible d'expliquer une partie de ces divergences.

Selon Fukunaga (1976), le débutant (I) ne recrute que peu d'unités motrices (points noirs). Au bout de quatre à six semaines (II), on observe une augmentation de la force, due principalement à une augmentation du nombre d'unités motrices recrutées, sans hypertrophie. Dans la suite de l'entraînement (III), c'est surtout l'hypertrophie qui sera la cause principale du gain de force.

Moritani et DeVries (1979) ont en quelque sorte reformulé ce modèle, en faisant la part des facteurs nerveux et des facteurs hypertrophiques dans le gain de force, en fonction de l'état d'entraînement. De la même façon que Fukunaga (1976), ils suggèrent qu'un sujet non entraîné voit sa force augmenter grâce aux facteurs nerveux principalement, tandis que l'athlète entraîné continue à progresser grâce aux facteurs structuraux.

Comme en témoignent les études d'Halbach et Strauss (1980), Roméro et coll. (1982), Eriksson et coll. (1981) et Currier et Man (1983), d'une durée de trois à cinq semaines avec des sujets non entraînés, le gain de force est dû principalement à des modifications d'ordre neuromusculaires.

Par contre, les études effectuées sur des athlètes entraînés avec une période de temps équivalente, soit 9 à 19 séances réparties sur 2 à 4 semaines (Kots et Chwilon, 1971 Andrianova et coll., 1971) et 30 séances sur 15 semaines (Chemerisin et coll., 1983), montrent que le gain de force maximale se fait conjointement avec un gain de masse musculaire significatif.

À la lumière de ces observations, il semble d'une part que le niveau d'entraînement des sujets joue un rôle dans les mécanismes sous-jacents à l'augmentation de la force musculaire volontaire (nerveuse ou structurale), et d'autre part que l'ES puisse provoquer ces deux types d'adaptations. Ainsi, dans la mesure où les gains de force provoqués par l'ES semblent se faire selon les mêmes mécanismes que ceux enregistrés après un entraînement utilisant la contraction volontaire, la question se pose maintenant en des termes assez simples: y a-t-il avantage à utiliser une méthode plutôt que l'autre?

COMPARAISON AVEC LES AUTRES RÉGIMES DE CONTRACTION

Comparaisons avec l'entraînement isométrique volontaire

Arzil et coll. (1974) ont comparé l'entraînement isométrique avec l'entraînement par ES. Les deux formes d'entraînement ont été utilisées avec deux groupes de dix athlètes, à raison de six entraînements par semaine pendant huit semaines. La séance consistait en dix contractions maximales de dix secondes avec cinq minutes de repos, ceci pour les deux méthodes. Les résultats montrent que le gain de force est plus rapide et plus élevé au moyen de la stimulation électrique (29 % contre 22 %).

Mohr et coll. (1985) ont effectué quinze séances d'entraînement avec des sujets féminins, au moyen de contractions volontaires isométriques maximales et de stimulations électriques à impulsions triangulaires de 50 Hz. Ils ont constaté une augmentation significative de 14.7 % pour la méthode isométrique, et une augmentation non significative de 0.7 % pour l'ES. Dans la mesure où les auteurs ne mentionnent pas le pourcentage de la force volontaire maximale utilisé pour l'entraînement par ES, il est difficile de savoir si ces résultats pour le moins surprenants sont dus à l'impossibilité de cette méthode à provoquer un gain de force, ou s'ils sont plutôt dus à une trop faible intensité de contraction, ou encore à une durée d'impulsion trop courte.

Quoi qu'il en soit, nous pouvons constater que la majorité des études rapportées dans le tableau 4 (75 %) ont tendance à montrer que l'entraînement par ES induit des gains de force aussi importants, mais pas plus grands que ceux provoqués par l'exercice volontaire. McMicken et coll. (1983) ont entraîné les quadriceps d'un groupe de huit sujets au moyen de stimulations utilisant un courant faradique de 75 Hz, selon le protocole de Kots et Chwilon (1971), et ceux d'un second groupe par des contractions isométriques volontaires maximales, selon le même protocole. Les auteurs n'ont pas observé de différence significative entre les deux méthodes d'entraînement dans le gain de force volontaire maximale (22 % et 25 % respectivement). Cette absence de différence a aussi été rapportée pour le biceps brachial (Raitsin, 1974 ; Miller et Thépaut-Mathieu, 1990) et l'adducteur du pouce (Cannon et Cafarelli, 1987 ; Duchateau et Hainaut, 1988).

Comparaisons entre l'entraînement isométrique volontaire et l'entraînement par électro-stimulation combiné à des contractions isométriques volontaires surimposées

Currier (1979) a utilisé des impulsions rectangulaires de 20 Hz, qu'il a combiné avec des contractions isométriques volontaires maximales, pour entraîner le quadriceps d'un premier groupe de sujets. Il a comparé les gains de force obtenus à ceux d'un second groupe entraîné uniquement à partir de contractions volontaires isométriques maximales. Il rapporte une amélioration de la force maximale volontaire plus grande pour la méthode combinée (26.1 % et 23.5 % respectivement).

Dans une étude ultérieure, Currier et Mann (1983) ont observé des résultats différents. Ils ont combiné des impulsions sinusoïdales de 2500 Hz modulées à 50 Hz à des contractions volontaires isométriques maximales pour entraîner le quadriceps. Le protocole, qui était le même pour le groupe s'entraînant avec des contractions volontaires isométriques maximales seules, comprenait dix contractions de quinze secondes avec des périodes de repos de cinquante secondes, durant quinze séances. Ils ont rapporté un gain de force de 30.4 % pour le groupe avec la méthode " volontaire ", contre un gain de 23.5 % pour le groupe utilisant la méthode combinée. Il est toutefois difficile de généraliser les résultats de cette étude. Comparer les effets respectifs de deux modes de contractions implique l'identité parfaite des séances d'entraînement. Or le groupe combiné s'entraînait à 90 % de la FMV; contre 119 % pour le groupe " volontaire ". Il n'est donc pas surprenant que l'amélioration soit plus importante dans ce dernier groupe.

D'ailleurs Hartsell (1986) a confirmé les observations initiales de Currier (1979), selon lesquelles l'entraînement combiné s'avérait plus efficace que l'entraînement par des contractions volontaires seul. Il a comparé le gain de force du quadriceps crural suite à un entraînement à base de contractions volontaires isométriques maximales, et suite à un entraînement combinant ce même type de contraction à des impulsions rectangulaires de basse fréquence (65 Hz). Le protocole était identique à celui de Kots et Chwilon (1971). Il a duré six semaines, à raison de cinq séances par semaine, et a permis d'observer une amélioration de 15.7 % pour le groupe " combiné ", contre 5.6 % pour le groupe volontaire.

Même Si peu d'études se sont attachées à comparer ces deux formes d'entraînement, les résultats montrent que les effets de la stimulation électrique combinée à des contractions volontaires isométriques peuvent être au moins équivalents, et parfois supérieurs à ceux d'un entraînement utilisant uniquement des contractions isométriques volontaires.

[Comparaisons avec diverses méthodes d'entraînement de la force musculaire](#)

Singer et coll. (1983) ont comparé les gains de force isométrique du quadriceps crural après douze séances d'entraînement dans cinq groupes de cinq sujets masculins.

Les groupes se sont entraînés

1. par électrostimulation,
2. au moyen d'exercices isométriques,
3. anisométriques
4. isocinétiques.

Le cinquième groupe servait de groupe témoin, et n'a pas effectué d'exercices.

Les gains de force maximale isométrique volontaire ont été obtenus, par ordre décroissant, au moyen des entraînements anisométriques et isotoniques (18 et 17 % respectivement), par l'entraînement isométrique (15 %), puis par l'entraînement par électrostimulation et le groupe contrôle (chacun 6 %). Ces résultats dressent un constat très sévère pour l'ES. Toutefois comme nous l'avons déjà remarqué pour l'étude de Currier et Mann (1983), on ne peut réellement comparer plusieurs modes de contraction que Si les charges d'entraînement sont rigoureusement identiques. Or dans l'étude de Singer et coll. (1983), non seulement aucun des quatre groupes n'a suivi le même protocole d'entraînement, mais en plus l'intensité des charges n'était pas la même. Cela peut expliquer en partie que l'entraînement par ES n'ait pas obtenu

de meilleurs résultats que ceux du groupe contrôle, et rend caduque la comparaison entre les différents modes de contraction.

Les études ultérieures rapportent des résultats tous différents. Nobbs et coll. (1986) rapportent un gain de force plus grand après un entraînement par ES (29.6 %) comparativement à un entraînement isocinétique volontaire (26.4 %) et à un entraînement combinant ces deux méthodes (16.8 %). Willoughby et Simpson (1996) rapportent l'inverse, puisqu'ils ont observé un gain de 20.87 % pour l'entraînement combiné, de 17.12 % pour l'entraînement isocinétique seul et de 13.63 % pour l'entraînement par stimulation électrique (impulsions sinusoïdales de 2500 Hz modulées à 50 Hz).

Il est donc difficile de tirer des conclusions sur l'efficacité des différents modes de contraction. Non seulement chaque étude utilise un protocole d'entraînement qui lui est propre, rendant ainsi toute comparaison avec les autres études difficile, mais en plus, comme nous l'avons fait remarquer pour les travaux de Currier et Mann (1983) et Singer et coll. (1983), les comparaisons des modes de contraction impliquent que toutes les caractéristiques de la charge d'entraînement soient identiques. Or ce n'est pas toujours le cas, surtout en ce qui concerne l'intensité relative utilisée.

CONCLUSION

Il ressort de cette synthèse de la littérature concernant l'utilisation de l'ES chez l'individu sain que cette méthode peut être intéressante dans un but d'entraînement sportif.

Tout d'abord on peut s'accorder sur le fait que l'entraînement par ES augmente la force maximale volontaire, dans des proportions qui demeurent toutefois très variables.

Ensuite, selon le niveau d'entraînement des sujets, la littérature suggère que l'ES est en mesure d'influer sur les facteurs nerveux comme sur les facteurs structuraux.

Enfin, concernant l'efficacité de cette méthode comparativement aux autres modes de contraction, il est difficile de conclure de façon uniforme. Il semble que l'ES puisse provoquer des gains de force similaires, mais rarement supérieurs, à ceux induits par l'entraînement volontaire isométrique maximal. En revanche, exception faite des études ayant utilisé des intensités différentes pour comparer les méthodes, on peut s'entendre sur le fait que l'entraînement combinant l'ES au mouvement volontaire, qu'il soit isométrique ou concentrique, provoque des gains de force supérieurs à chacune de ces techniques utilisées séparément.

Toutefois, à l'heure où l'efficacité de l'entraînement passe par une plus grande spécificité, certaines limites apparaissent. En effet, lorsqu'un muscle est activé par ES, l'ordre de recrutement des UM est différent de celui observé dans des conditions naturelles d'activation. Selon le principe de la taille (Henneman, 1965), les petites UM sont recrutées avant les grandes. Or l'ES a tendance à recruter prioritairement les grandes UM par rapport aux plus petites (Enoka, 1988; Duchateau et Hainaut, 1988). De plus l'entraînement par ES active les groupes musculaires séparément. Or la plupart des gestes sportifs nécessitent une coordination précise non seulement entre les muscles synergistes, mais aussi entre la musculature agoniste et antagoniste (Duchateau, 1992). Ces arguments suggèrent que l'ES, bien qu'elle soit capable de provoquer des adaptations semblables à celles des méthodes par contractions volontaires, ne doit pas pour autant être considérée comme un moyen de

substitution. En revanche elle pourra être utilisée avantageusement comme complément aux méthodes classiques d'entraînement de la force.

BIBLIO

- ALBRIGHT B, YUGO D (1985) Quadriceps muscle strength gains utilizing electrical stimulation. *Phys Ther*65 : 696.
- ALON. G, Mc COMBE SA, KOUSTANTONIO S, STUMPHAUSER LJ, BURGWIN KC, Parent MM, BOSVOTH RA (1987) Comparison of the effects of electrical stimulation and exercise on abdominal musculature. *J Orthop Sports Phys Ther*5 : 567-573.
- ANDRIANOVA GG, KOTS YM, CHWILON VA, MARTINOV A (1974) Die Anwendung der Elektrostimulation for das training der muskelkraft. *Leistungssport*2: 138-142.
- ANZIL F, MODOTTO P ZANON S (1974) Enfkrungrs bericht Ober die Vermekrungr Isometrischen maximalen Muskelkraft durch Zusätzliche Elektrostimulation und die kriterien ihrer anvendung in sport. *Leistungssport*2:143-146.
- BOUTELLE D, SMITH B, MALONE TA (1985) Strength study utilizing the electro-stim. 180. *J Orthop Sports Physic Ther*7: 50-53.
- CABRIC M, APPEL HJ, RESIC A (1987) Effects of electrical stimulation of different frequencies on the myonuclei and fiber size in human muscle. *Int J Sports Med* 8 : 323-326.
- CABRIC M, APPEL JH, RESIC A (1988) Fine structural changes n electrostimulated human squeletal muscle. *Eur J Appli Physiol* 57:1-5.
- CANNON RJ, CAFFARELLI E (1987) Neuromuscular adaptation to training. *J Appl Physiol* 63 : 2396-2402.
- CASPERSSON T (1950) Ceil growth and ceII function. New York, WW Norton.
- CHEMIRISIN AF KOSINSKY VI, ROZMAN AM (1983) Use of imitational électrostimulation in the training of high level swimmers. Traduction anglaise: *Soviet Sport J* 1: 56.
- COMETTI G (1988) L'électrostimulation. In G Cometti, Les méthodes modernes de musculation. Tome 1: Données théoriques. Université de Bourgogne : 253-341.
- CRIELAARD JM, NAMUROIS G, VANDER THOMEN M, FRANCHI-MONT P (1988) Etude des courants de moyenne fréquence son intérêt dans la musculation du quadriceps. In JM Heulen et L Simon, *Muscle et rééducation*. Paris, Masson : 213-218.
- CURRIER D, LEHMAN J, LIGHFOOT P (1979) Electrical stimulation in exercise of the quadriceps femoris muscle. *Phy Ther*59:1508-1512.
- CURRIER D, MANN R (1983) Muscular strength development by electrical stimulation healthy individuals. *Phys Ther*63 :915-921.
- DAVIES CTM, Mc GRATH K (1982) Effects of training and chronic tetanic stimulation on voluntary and electrically evoked contractions at the triceps sural in a human subject. *J Physiol (London)* 329 : 48-49.
- DELITTO A, BROWN M, STRUBE R, LEHMAN RC (1989) Electrical stimulation of quadriceps in elite weight liher a single subject experiment. *IntJSportsMed*10:187-191.
- DUCHATEAU J, HAINAUT K (1988) Training effects of sub-maximalelectrostimulation in human muscle. *Med Sci Sports Exerc* 20 (1): 99-104.
- EDOUARDS RHT, WIKIE DR, DAWSON MJ, GORDON RE, SHAW D (1982) Clinical use of nuclear magnetic resonance in investigation of myopathy. *Lancet* 725-731.
- ENOKA RM (1988) Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Med* 6:146-168.
- ERIKSSON E, HÅGGMANK T, KIESSLING KH, KARLSON J (1981) Effect of electrical stimulation on human squeletal muscle. *Int J Sports Med*2:18-22.
- FAHEY TD, HARVEY M, SCHROEDER R', FERGUSON F (1985)Influence of sex differences and knee joint position on electrical stimulation modulated strength increase. *Med Sci Sports Exero* 17(1): 144-147.

- FAR RANCE BW (1982) Acute and chronic effects of surface electrical stimulation on human skeletal muscle. Thèse de maîtrise. Université de Waterloo (Ontario).
- FUKUNAGA T (1976) Die absolute Muskelkraft und das Muskelkrafttraining. Sportarzt und Sportmed 11: 255-256.
- GOBELET C, ERENTES C, DÉRIAZ JP, LEYVRAZ PJ, VOLKEN H, LIVIO JJ (1989) Modification musculaire après entraînement électrique chez l'homme. Médecine du sport 63 (6): 310-312.
- Gobelet C (1990) Electrostimulation. In M Rieu, X séminaire de bioénergétique, entraînement surentraînement. Paris, Revue EPS : 63-64.
- HAINAUT K, DUC HATEAU J (1992) Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise. Sports Medecine 14 (2): 100-113. HAKKINEN K, KOMI PV (1986) Training-induced changes in neuromuscular performance under voluntary and reflex conditions. Eur J ApplPhysiol 55:147-155.
- HAKKINEN K, KOMI PV (1983) Alterations of mechanical characteristics of human skeletal muscles during Strength training. EurJApplPhysiol 50:161-172.
- HÄKKINEN K, KOMI PV, ALEN M Acta Physiol Scand 125 : 573-600. HALBACH JW, STRAUSS D (1980) Comparison of electro-myostimulation to isokinetic training in increasing power of the knee extensor mechanism. J Orthop Sports Phys Ther 2 : 20-24.
- HARTSEL HD (1986) Electrical muscle stimulation and isometric exercise effects on selected quadriceps parameters. J Orthop Sports Phys Ther 8 (4): 203-208.
- HOWARD JD, ENOKA RM (1987) Enhancement of maximum force by contralateral limb stimulation. J Biomech 20 : 908.
- IEHL R, DANIELSON A, HOEGH JE, BARR JO, COOK TM (1984) Training effects of electrical stimulation on abdominal muscles. Phys Ther. 64:751.
- KAGERREIS R, Mc AVOY M, KILLAN C (1986) Static and dynamic Strength change using high frequency electrical stimulation in varying knee angles. Phys Ther 66 : 774.
- KOMI P, VITASALO', RAURAMA R, VIHKO V (1978) Effect of isometric Strength training on mechanical, electrical and metabolic aspects of muscle function. Eur J Appl Physiol 40 : 45-55.
- KOTS YM, CHWILON BA (1971) Entraînement de la force musculaire par la méthode d'électrostimulation, communiqué n 2: méthode d'entraînement Teorija/praktika fisishekoj kultury 4 66-73.
- KRAMER JF, SEMPLE JE (1984) Comparison of selected strengthening techniques for normal quadriceps. Physiother Can 6 300-304.
- KRCKA J, ZRUBAK A (1970) Tentative de renforcement des muscles par courant électrique. Kinanthropologie 2 (1): 5-54.
- KUBIAK RJ, WHITMAN KM, JOHNSTON RM (1987) Changes in the quadriceps femoris muscle Strength using isometric exercise versus electrical stimulation. J Orthop Sports Phys Ther 8 : 537-541.
- LAI HS, De DOMENICO G, STAUSS G (1988) The effect of different electro-motor stimulation training intensities and Strength improvement. Austral J Physiother 34:151-164.
- LAUGHMAN RK, YODAS JW, GARRETT TR (1983) Strength changes in normal quadriceps femoris muscle as a result of electrical stimulation. Phys Ther 63 : 294-299.
- LEWIS SJ, NYGAARD E, SANCHEZ J, EGELBLAD H, SOLTIN B (1984) Static contraction of the quadriceps muscle in man : Cardiovascular control and responses to one-legged Strength training. Acta Physiol Scand 122 : 341-353.
- LYSEN R (1983) Elektrostimulation als Muskelkrafttraining. Leichtathletik 34:15-18.
- Mc MICKEN DF, TODD-SMITH M, THOMSON C (1983) Strengthening of human quadriceps muscles by cutaneous electrical stimulation. Scand J Rehab Med 15 : 25-28.
- MILLER C, THEPAUT-MATHIEU C (1990) Comparaisons d'entraînements effectués sous électrostimulation et contraction volontaire. Science et motricité 11:16-27.
- MOHR T, CARLSON B, SULENTIC C, LANDRY R (1985) Comparison of isometric exercise and high volt galvanic stimulation on quadriceps femoris muscle strength. Phys Ther 65 : 606-612.
- MORITANI T, DeVRIES HA (1979) Neurofactors versus hypertrophy in the time course of muscle Strength gain. Am J Phys Med 58; 115-130. NOBBS LA, Rhodes EC (1986) The effects of electrical stimulation and isokinetic exercise on muscular power of the quadriceps femoris. J Orthop Sports Phys 8 : 260-268.
- OWENS J, MALONE T (1983) Treatment parameters of high frequency electrical stimulation established on the electro-stim 80. J Orthop Sports Phys Ther 4:162-168.
- PARKER RH (1985) The effect of mild one leg isometric and dynamic training. Eur J Appl Physiol 54 : 262-268.

- PORTMANN M (1976) L'entraînement par électrostimulation. Trente pour cent (Mission Quebec '76) 3 : 6.
- PORTMANN M (1978) Effets de l'entraînement par électrostimulation sur le quadriceps crural de deux athlètes olympiques. Données non publiées. Université de Montréal.
- PORTMANN M (1980) Électrostimulation. In : M Nadeau, F Péronnet, Physiologie appliquée de l'activité physique. Paris, Vigot: 255-258.
- PORTMANN M (1982) Entraînement isométrique: spécificité des effets en fonction de la position d'entraînement. Congrès de l'ACFAS. Montréal.
- PORTMANN M (1991) Amélioration de la force musculaire au moyen de la stimulation électrique et application à l'entraînement sportif. Thèse de Doctorat. Département d'Education Physique, Université de Montréal.
- RAITSIN LM (1976) The effectiveness of isometric and electrostimulated training on muscle strength at different joint angles. Theonja i praktika fisischekoi kultury 12 : 33-35. Traduction : Yessis 2 : 35-39.
- ROMERO JA, SANFORD TL, SCHROEDER RV, FAHEY TD (1982) The effects of electrical stimulation on normal quadriceps on Strength and girth. Med Sci Sports Exerc 3:194-197.
- RUTHERFORD J (1981) Electrostimulation training for volleyball players. Volley ball Technic J 1: 35-38.
- SELKOWITZ DM (1985) Improvement in isometric Strength of quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation. Phys Ther 65:186-195.
- SINGER KP, GOW PJ, OTWAYWF, WILLIAMS M (1982) Acomparision of electrical muscle stimulation, isometric, isokinetic Strength training programs. NZL Sports Med 11: 61-63.
- SINGER KP (1986) The influence of unilateral electrical muscle stimulation on motor unit activity in atrophic human quadriceps. Austral J Physiother 32 : 31-37.
- SOO CL, CURRIER P, THRELED AJ (1988) Augmenting voluntary torque of healthy muscle by optimization of electrical stimulation. Phys Ther 3: 333-337.
- St PIERRE D, TAYLOR AW, LAVOIE M, SELLERS W, KOTS YM (1986) Effects of 2 500 Hz sinusoidal current on fiber area and Strength of the quadriceps femoris. J Sports Med 26 : 60-66.
- STEFANOVSKA A, VODOVNIK L (1985) Change in muscle force following electrical stimulation. Scand J Rehabil Med 17:141-146.
- TACHINO K, SUSAKI T, YAMASAKI (1989) Effect of electromotor stimulation on the power production of a maximally stretched muscle. Scand J Rehabil Med 21:147-150.
- TAYLOR AW, KOTS YM, LAVOIE M (1978) The effect of faradic stimulation on skeletal muscle fiber area. Can J Appl. Sports Sci 3:185.
- WILLOUGHBY DS, SIMPSON S (1996) The effects of combined electrostimulation and dynamic muscular contractions on the Strength of college Basket Bail players. J Strength and Cond Res 10 (1): 40-44.
- YASUDA Y, MIYAMURAMA M (1983) Cross transfer effects of muscular training on blood flow in theipsilateral and controlateral forearms. Eur J Appl. Physiol 51: 321-329.