

Chez le même éditeur

Dans la collection 3R (A.N.M.S.R.)

- Médecine de rééducation et hémipégies vasculaires, coordination M. GENTY et P. PASQAT-DENI
- Lombalgies chroniques et médecine de rééducation, coordination P. BONDEL et M. DOWENACH
- Les troubles de l'équilibre, coordination Ph. DUPONT

Dans la collection "Précis pratiques de rééducation"

- L'axe-tronc par P. C. LEBOIS
- Ventriloque et protection de la colonne cervicobasale par Y. MAROZZI et V. CLOUET
- Médecine de rééducation de l'école douloureuse par J. L. JOURNET, M. J. MATHIAS et P. G. THOUQUÉ
- Rééducation et perte d'autonomie physique chez le sujet âgé (la régression psychomotrice) par E. TAYEB, Y. JAI, et F. MOUSSY
- Rééducation des troubles de l'équilibre des axes cervico-sacro-lombaire par P. G. THOUQUÉ, R. GUYOT, R. GUYOT, P. MOUJOU
- Océanothérapie des troubles de l'audition et de la rééducation par P. RUIZ et C. DESVET
- Médecine de rééducation des troubles de la parole par C. GENET
- Rééducation des pieds plats par B. CHASTAN
- Physiologie comparée des troubles de la parole, du sujet âgé lymphatique manuel, troubles de la parole, gymnastique par E. et M. FOUAD
- La rééducation de la main, par C. MATHIAS et M. ARNAUD
- Electrothérapie et rééducation fonctionnelle par F. OUPON
- Coaxialité et manuel d'orthopédie des scapules sans orthopédie originale par J. CHÉRIEUX

Hors collection

- Les chaînes musculaires, 1. J. Force et colonne cervicale, 2^e éd., par L. BUSQUET
- Les chaînes musculaires, 2. J. Joints, cyrises, scolioses et déformations thoraciques, par L. BUSQUET
- Les chaînes musculaires, 3. J. La pathologie, par L. BUSQUET
- Les chaînes musculaires, 4. J. Membres inférieurs, par L. BUSQUET
- La cheville (physiologie, pathologie, thérapeutique et rééducation) par J. P. BESNIER
- Infiltrations, Quand ? Comment ? 40 techniques, par P. BEVÉAU
- Aider une personne âgée à choisir son lieu de vie, par H. BILLET
- Transport et déplacement des malades, Aide à l'automatisme par l'ergonomie, par G. OUPON

Association Nationale des Médecins Spécialistes de Rééducation
(A.N.M.S.R.)

Les stratégies de renforcement musculaire

R. BENSERRAF, J. DE BRUCCORDE, H. DEJANVILLE,
J.P. DIDIER, L. DUPONT, B. HORTSMAN, PH. MAROZZI,
J. MIREY, P. MIDDLETON, Y. MOUJOU,
P. F. RIGANI, C. F. ROQUES, D. SCAUDINO

Coordination : G. BOILEAU, M. GENTY et P. THOUQUÉ

ÉDITIONS FRISON-ROCHE
18, Rue Dauphine - 75006 PARIS
1995

AVANT-PROPOS

Le renforcement musculaire se situe au centre de la pratique quotidienne du rééducateur, que celle-ci soit orientée vers la pathologie orthopédique, traumatologique ou neurologique.

Ces dernières années ont vu s'accroître les connaissances dans le domaine de la contraction musculaire, l'innervation fonctionnelle du muscle et l'évaluation des différents paramètres de la contraction musculaire (force, puissance, endurance, fatigue).

L'évaluation de ces paramètres, à l'aide d'appareils de haute technologie, est déjà de pratique régulière pour certaines équipes.

Au travers de cette évaluation "métrologique" du défilé, les systèmes modernes d'analyse de la fonction musculaire, encore expérimentaux ou déjà d'usage courant, contribuent à une meilleure reproductibilité des protocoles de renforcement musculaire, ce qui les rend plus faciles à évaluer et à comparer.

Les auteurs de ce fascicule ont été choisis au sein des équipes ayant mené une réflexion approfondie dans le domaine des stratégies de renforcement musculaire.

Après un rappel des données fondamentales les plus récentes, une place de choix a été réservée aux expériences cliniques.

L'ensemble de ces communications a été présenté lors de la 9ème journée de l'A.N.M.S.R. le 20 mai 1995 à PARIS.

© Editions Frison-Roche, 1995

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous les procédés réservés pour tous pays.

Toute reproduction intégrale et partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 11 mars 1957, art. 20 et 41 et Code pénal, art. 425).

ISBN 2-87671-201-6

BIFONCTIONNALITÉ ET RENFORCEMENT MUSCULAIRES

L. Dupont, E. Wardehain*, C. Pérol, G. Lensef*, Ph. Voisin**, J.L. Vanhée**.

RÉSUMÉ

Le caractère plurifonctionnel de la plupart des muscles autorise à considérer chacune de leurs fonctions, principales ou accessoires, séparément ou simultanément. La réalisation de tâches associant flexion (β) du coude et supination (S) de l'avant-bras conduit à une plus forte activation du Biceps Brachial (BB). Cette suractivation musculaire doit trouver des applications sportives ou rééducatives. L'étude que nous avons menée vise à comparer les performances du BB après une période d'entraînement isométrique de 5 semaines en simple (groupe F : $n=6$) ou double tâche (groupe F+S : $n=6$). L'effet des 2 types d'entraînement est testé en mesurant chaque semaine et pour chaque groupe les couples mono (F ou S) et bidirectionnels (F+S) maximaux et les électromyogrammes de surface des chefs interne et externe du BB.

Les principaux résultats font apparaître que pour les 2 groupes, une amélioration des performances mécaniques est constatée quelle que soit la fonction testée. Par ailleurs, le renforcement s'opère différemment selon le

Département Génie Biologique, ERA CNRS 858, Université de Technologie de Compiègne, BP 619, 60205 COMPIÈGNE CEDEX.

* Laboratoire d'Etudes de la Motricité Humaine, Faculté des Sciences du Sport, 59730 RONCHIN.

** Centre de Recherche et Réadaptation Fonctionnelles Spécialisées -E-SPORT-, BP 01, 59260 LILLE-III, LEMMES.

chef musculaire étudié. C'est au niveau du chef interne du Biceps que l'amélioration des performances motrices est la plus importante.

Le bénéfice apporté par l'entraînement en bifonction est surtout observable lorsque seule la fonction accessoire du muscle est sollicitée puisqu'une amélioration très importante des performances mécaniques et électromyographiques est constatée dans cette fonction pour les sujets du groupe F+S.

L'ensemble des résultats démontre l'intérêt de la prise en compte du caractère plurifonctionnel des muscles pour optimiser l'efficacité des programmes de renforcement et suggère une adaptation de ces programmes en fonction de la localisation supposée du déficit fonctionnel au sein d'un même muscle.

BIFONCTIONNALITÉ MUSCULAIRE...

De par leur modalité d'insertion sur les masses osseuses, la plupart des muscles séries squelettiques peuvent déplacer soit une même articulation dans plusieurs directions (articulation à plusieurs degrés de liberté), soit plusieurs articulations (23, 24, 33). Les bilans fonctionnels établis par électrostimulation (11) ou par électromyographie (1) illustrent également le fait que nombre de ces muscles sont bi-, voire plurifonctionnels.

Le caractère bi-, ou plurifonctionnel d'un muscle peut ainsi se définir comme la possibilité qu'a ce muscle de participer à deux ou plusieurs fonctions motrices, séparément ou simultanément. Les fonctions primordiales sont alors classiquement distinguées des fonctions accessoires.

Il est maintenant bien établi que de tels muscles ne se comportent pas de façon homogène. Cette inhomogénéité de comportement a été initialement démontrée par électromyographie (EMG) aiguille au niveau du Biceps Brachial (BB), muscle bifonctionnel participant à la flexion (F) du coude et à la supination (S) de l'avant-bras (36). En effet, il a pu être montré, en contraction isométrique sous-maximale, que le recrutement des unités motrices (UM) : ensemble formé par un motoneurone alpha, son axone et les fibres musculaires qu'il innerve (5) pouvait partiellement dépendre de la tâche motrice réalisée : certaines UM étant activées sélectivement en F (les «Flexion Units»), en S (les «Supination Units»), la majorité des UM du muscle (les «Summing Units») pouvant malgré tout être activée tant dans l'une que dans l'autre des fonctions (36). Il semble par ailleurs que ces UM soient localisées différemment dans le muscle (37) : UM latérales pour F, médiales pour S, centrales pour F+S.

Depuis, l'existence au sein d'un même muscle de différentes sous-populations d'UM a été démontrée chez l'Homme pour la plupart des muscles du membre supérieur (22, 38, 39). Il semble donc que le recrutement des UM d'un muscle bifonctionnel puisse ne pas répondre en totalité au principe de la taille- (18) selon lequel les UM innervées par des axones de petits calibres sont recrutées avant les UM innervées par des axones de gros calibres. Les travaux récents de Wolf et al. (41) sur les Jumeaux, ou de McMillan (26) sur le Temporal confirment également cette partition musculaire en sous-populations d'UM dont le recrutement dépend de la tâche motrice réalisée.

Les résultats obtenus chez l'Homme s'inscrivent des lors dans le cadre du concept de compartiments neuromusculaires décrit essentiellement chez l'animal pour de nombreux autres systèmes musculaires (2, 9, 12, 25). Chez le Chat, Hoffer et al. (19) décrivent par exemple trois groupes d'UM fonctionnellement et anatomiquement bien différenciés au sein du Couffeur : chacun de ces groupes étant actif pendant une phase spécifique de la marche.

Ces compartiments neuromusculaires peuvent ainsi être définis comme des sous-volumes distincts de muscle consistant en une population de fibres musculaires et de récepteurs musculaires qui sont innervés par une branche primaire d'un nerf musculaire- (2). Ces compartiments musculaires relèveraient même d'une organisation topographique des noyaux moteurs (16, 40). Chez l'Homme, cette possibilité de compartiments neuromusculaires fonctionnellement dépendants n'a cependant trouvé de support anatomique que dans l'étude récente de Segal (35) menée sur le BB de cadavres.

L'ensemble de ces études porte sur l'analyse d'EMG intra-musculaires qui, par définition, rendent compte de l'activité d'un nombre restreint d'UM. Une approche plus globale du problème, utilisant l'EMG de surface comme indicateur de l'activation musculaire par le système nerveux central (SNC) a permis de retrouver un même type de comportement du muscle bifonctionnel. Des différences notables dans les EMG de surface recueillis sur un muscle bifonctionnel exerçant l'une et ou l'autre de ses fonctions en conditions isométriques ont déjà pu être établies (Paton et Brown, 30, sur le Grand Pectoral; Péron et al., 51, sur le BB). Analysant les contributions relatives de chacun des deux chefs du BB aux efforts de F et de S, les travaux de Caldwell et al. (7) montrent qu'*a priori* on ne peut leur accorder une totale identité fonctionnelle. La longue portion du BB serait même plus impliquée que la courte en effort sous-maximal de supination (31). Les principaux résultats obtenus en contractions isométriques sous-maximales, font ainsi apparaître une augmentation du niveau d'activité EMG du BB lorsqu'un couple de supination est simultanément associé

au couple de flexion. Initialement décrite en terme de facilitation neuromusculaire par Cnockaert et al. (8), cette suractivation du muscle bifonctionnel travaillant en double tâche (F+S) est confirmée un peu plus tard aussi bien pour des intensités d'efforts sous-maximales (3, 4, 6, 10, 17) que maximales (7, 20, 32). Plusieurs mécanismes peuvent être évoqués pour rendre compte de cette suractivation musculaire. Il peut s'agir :

- d'un recrutement spatial élargi en tâches associées (F+S) ;
- d'une augmentation de la fréquence de décharge des LM déjà recrutées (recrutement temporel) ;
- d'une plus forte activation du muscle bifonctionnel par levée des processus inhibiteurs dès lors que l'on autorise le muscle à travailler en tâche bidirectionnelle.

Ces 3 processus ne s'excluent d'ailleurs pas l'un l'autre.

... ET RENFORCEMENT MUSCULAIRE

Musculation, entraînement, rééducation, ont un objectif commun, celui d'améliorer la performance motrice. Dans tous les cas, c'est un gain qui est recherché, c'est-à-dire un renforcement. Les stratégies de renforcement musculaire adoptées pour parvenir à cet objectif sont très diversifiées et il n'existe pas aujourd'hui d'accord unanime sur la meilleure méthode pour renforcer la fonction motrice d'un muscle. Cependant, il est généralement admis que pour obtenir un renforcement optimum, il faut solliciter, au cours du protocole d'entraînement, un nombre maximum d'LM. En d'autres termes, il s'agit donc de définir une méthode de renforcement durant laquelle un maximum de fibres musculaires recrutables sera activé.

A la vue de l'ensemble des résultats précédemment décrits, il est aisément concevable qu'au cours d'un effort volontaire, la distribution des niveaux d'excitation entre les différents muscles (agonistes, antagonistes, posturaux) ou entre les différents groupes d'LM impliqués (si l'on admet une partition du muscle en sous-populations d'LM) soit régulée par un mécanisme neurophysiologique qui tient compte à la fois du niveau de force requis et de la direction de cette force (pour le coude, par exemple, F, S, F+S). L'importance de ces facteurs neurophysiologiques n'exclut cependant pas le rôle éventuel de facteurs musculaires (histochimiques et mécaniques). Dans le cas d'un effort volontaire statique et maximum, la force maximale volontaire (FMV) est directement corrélée, non seulement à

l'importance de la masse musculaire mise en jeu (surface de section transversale du muscle) et à sa typologie (types de fibres musculaires, facteurs musculaires) mais aussi au niveau d'activation musculaire par le SNC (facteurs neurophysiologiques). On comprend ainsi aisément que l'adaptation du muscle et de ses LM au type d'entraînement qu'il subit mette en jeu d'une part des mécanismes siégeant au niveau de la commande du muscle et d'autre part des mécanismes siégeant au niveau de la générateur de force lui-même (28, 34). Il est admis actuellement que les adaptations de la commande précèdent celles intrinsèquement musculaires (13) (pour une revue de question (28, 29)). Les premières sont essentiellement présentes lors de la phase initiale de la période d'entraînement alors que les secondes deviennent prépondérantes après 3 à 5 semaines d'exercice (34).

Dans ce contexte, si la réalisation de tâches associant les deux fonctions d'un muscle bifonctionnel amène une augmentation de son niveau d'activation, alors la prise en compte du caractère pluri-fonctionnel de la plupart des muscles doit pouvoir être mise à profit dans le cadre de protocoles de renforcement musculaire.

Le présent travail se propose donc de tester cette hypothèse en étudiant les modifications pré-post entraînement de l'activité des 2 chefs du BB consécutives à un entraînement isométrique de flexion (groupe F) du coude ou de flexion et supination combinées (groupe F+S).

Les résultats sont analysés et discutés au regard des données de la littérature. En conclusion, nous essaierons de dégager les conditions optimales de renforcement des fonctions motrices d'un muscle bifonctionnel.

TECHNIQUES ET PROTOCOLES

DISPOSITIF ERGOMÉTRIQUE ET DETECTION DES SIGNAUX MÉCANIQUES

Les sujets sont en position assise stabilisée au moyen de sangles thoraciques et scapulaires sur un siège adaptable à leur morphologie et éventuellement à leur handicap. Le membre supérieur est couplé à un dispositif de reproduction du mouvement (figure 1, 15) sur lequel le bras et l'avant-bras sont maintenus dans un plan horizontal. L'avant-bras du sujet repose sur une plaque support rigide (a) mobile autour d'un axe vertical (b) coïncidant avec l'axe de rotation du coude. La main tient une poignée (c) placée à 45° et solidaire d'un guide mouvement de prono-supination (d). Ce guide mouvement est lui-même solidaire de la plaque support et il est constitué de 2 cages en nylon : une cage externe fixe et une cage interne mobile, à laquelle est fixée la poignée.

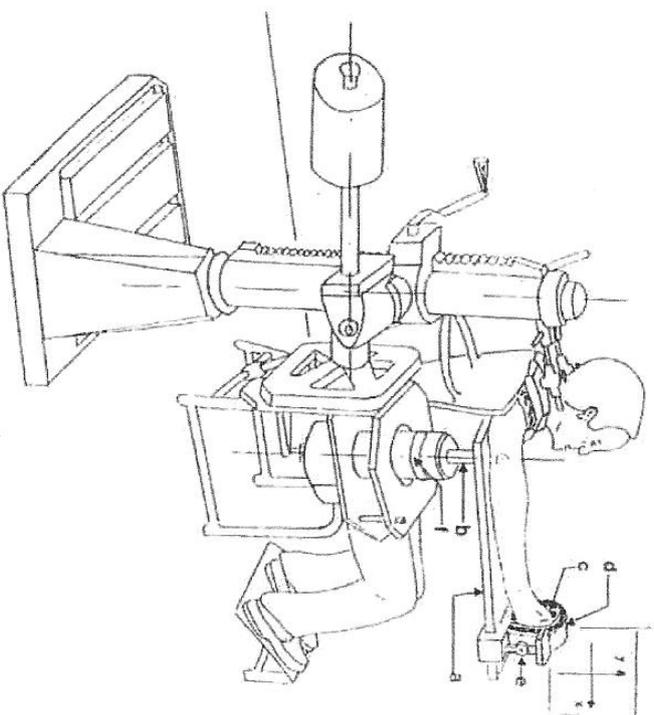


Figure 1 : Vue d'ensemble de la situation expérimentale.

- a. plaque support de l'avant-bras
- b. axe de rotation
- c. poignée de supination-pronation
- d. guide mouvement de prono-supination (P/S)
- e. capteur de force (P/S)
- f. dispositif d'accouplement du capteur de force de flexion-extension

Entre les 2 cages, une liaison par roulement à billes diminue les forces de frottement.

La quantification des efforts isométriques de supination/pronation (S/P) est réalisée à l'aide d'un capteur de force (e) (Schlumberger CD 7400/2, 25 daN) à jauges de contrainte, alimenté par un conditionneur (Schlumberger type C30).

Pour les efforts isométriques de flexion/extension (F/E), la plaque support de l'avant-bras, bloquée à 90° de flexion, est reliée par un dispositif

de d'accouplement (D) à un capteur de force (Entan, 500 daN) alimenté par un conditionneur développé au Service Electronique de l'Université de Compiègne.

Des barres d'épaules et un repose-pied confèrent au sujet une bonne stabilité posturale même aux efforts intenses, permettant ainsi d'éviter au maximum la participation d'autres muscles.

DETECTION DES SIGNAUX EMG DE SURFACE

L'activité électromyographique est détectée, par dérivation bipolaire, par des électrodes de surface type BECKMAN (Ag / AgCl, diamètre actif 8 mm) placées sur le corps charnu de chacun des 2 chefs du BB en dérivation longitudinale (distance inter-électrodes : 2 cm).

Les signaux EMG ainsi détectés font ensuite l'objet d'une amplification.

Les signaux mécaniques et EMG sont dirigés vers 2 dispositifs : un système d'enregistrement sur cassette pour exploitation différée et un double système de visualisation sur écran :

- Un oscilloscope analogique / numérique (Gould DSO 1501) permettant un contrôle des niveaux EMG par l'expérimentateur ;
- Un oscilloscope analogique (Tektronics 5103 N) utilisé en mode XY, disposé face au sujet. Le signal de sortie du capteur de F/E est adressé en X et celui du capteur de S/P en Y si bien que l'index se déplace sur l'écran en fonction des 2 composantes. La position de l'index au centre de l'écran indique une relaxation générale. Il est ainsi possible d'effectuer tous types de contractions, isolées (F, S) ou combinées (F+S), de quantifier chaque composante mécanique et de différencier les stratégies motrices utilisées. Un logiciel mis au point à l'UTC (Spatol / Calvise, 14) permet l'acquisition et le traitement synchrone des 2 tracés mécaniques et des signaux EMG.

Ces signaux sont numérisés à raison de 1024 points par seconde : une valeur moyenne de couple est calculée toutes les 500 ms. Le traitement des signaux EMG consiste en un redressement puis une intégration sur la fenêtre définie pour la mesure du couple. Il est donc possible d'obtenir une valeur moyenne de couple et les valeurs moyennes des EMG intégrés (EMGi) qui lui correspondent.

Protocoles

Deux impératifs sont pris en compte lors de l'élaboration des protocoles :

- Le respect d'un planning compatible avec celui d'une structure de soins
- La comparabilité de l'approche sur des sujets « valides » avec celle sur des sujets en cours de rééducation.

C'est pourquoi notre choix méthodologique est de tester les effets d'un entraînement isométrique de courte durée (5 semaines) correspondant à la durée généralement accordée au travail statique intermittent (T.S.I. ou méthode de Troisième) lors d'une rééducation post-traumatique.

Le protocole d'entraînement retenu est celui validé par Miller (27), sur 16 sujets sportifs, pour des efforts isométriques volontaires de flexion du coude. Les gains de force obicus par cet auteur sont en moyenne de 45 % à l'angle entrainé (25° de flexion du coude).

Population

La population est majoritairement constituée de professeurs d'Education Physique et Sportive dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Moyennes de l'âge, de la taille et de la masse corporelle des sujets entraînés en flexion (groupe F, N=6) ou en flexion et supination associées (groupe F+S, N=6).

GROUPE (N = 6)	AGE (ans)	TAILLE (cm)	MASSE (kg)
F	24 ± 1	173 ± 7	67 ± 7
F + S	25 ± 2	181 ± 5	74 ± 5

Protocole d'entraînement

Les sujets sont entraînés en position assise, épaule en abduction à 90°, coude fléchi à 90°, main à 45°. Le protocole consiste en une répétition d'efforts isométriques volontaires unidirectionnels de flexion (F) du coude (groupe F) ou bidirectionnels c'est-à-dire de flexion et supination simultanément associées (groupe F+S). Il se déroule sur 5 semaines à raison de 3 séances d'entraînement par semaine. Une séance comporte 5 séries de 5 efforts se succédant à une cadence de 3 efforts par minute. Entre 2 séries, une récupération de 2 minutes est ménagée. Le temps de maintien du niveau de force est de 6 secondes. L'intensité de l'effort est fixée à 70 % de la FMV du jour, mesurée au début de chaque séance, après échauffement, dans la position d'entraînement. Cette FMV est mesurée à partir de 3 efforts maximaux de 4 secondes. Deux minutes de repos sont ménagées entre chacun de ces efforts. Seule la meilleure performance est retenue. La FMV est définie comme la valeur maximale de la force maintenue constante au moins une seconde. Cette FMV est mesurée à l'aide de l'oscilloscope utilisé en mode XY (F adressée en X et S en Y). La consigne donnée aux sujets du groupe F pour la mesure de la FMV en flexion est de développer un effort maximal de flexion du coude. La consigne de S/P involontairement associée est l'absence libre de s'exprimer. L'entraînement consiste alors à répéter 5 séries de 5 efforts à 70 % de cette FMV.

Aux sujets du groupe F+S, il est demandé d'associer maximument flexion et supination. On mesure ainsi une FMV en flexion et la FMV simultanément associée en supination. L'entraînement consiste alors à répéter 5 séries de 5 efforts en associant simultanément 70 % de la FMV en F et 70 % de la FMV en S. Pendant la séance d'entraînement, le sujet contrôle les niveaux de force imposés à l'aide de l'oscilloscope XY.

Protocole de test

L'effet de l'entraînement est testé en mesurant chaque semaine et pour chaque groupe les couples et TEMG de surface du Biceps interne (BI) et du Biceps externe (BE) lors d'efforts isométriques volontaires maximaux uni- (F ou S) et bidirectionnels (F+S). Des couples sous-maximaux sont également requis en F et en S pour rapprocher les relations EMG-Couple correspondantes. Ces mesures sont effectuées dans les mêmes conditions que lors de l'entraînement, en début de semaine et le lundi qui suit la fin du protocole d'entraînement (6 tests au total).

Ainsi chaque test comprend :

- Des efforts maximums de 4 secondes proposés dans un ordre aléatoire (2 en F, 2 en S, 2 en F+S) ;
- Des efforts unidirectionnels sous-maximums de 6 secondes, aléatoirement présentés à 25 %, 50 %, 75 % du couple maximal détecté dans la fonction (F ou S). Chaque niveau de force est requis 2 fois.

Des temps de repos de 2 mn sont ménagés entre chaque effort afin d'éviter l'installation d'un processus de fatigue qui interférerait avec l'objectif poursuivi, à savoir la quantification des niveaux de commande musculaire et des couples développés pour chaque type d'effort.

A titre d'exemple, un échantillon d'enregistrement des données mécaniques et électromyographiques recueillies en effort maximal de type F+S est rapporté figure 2.

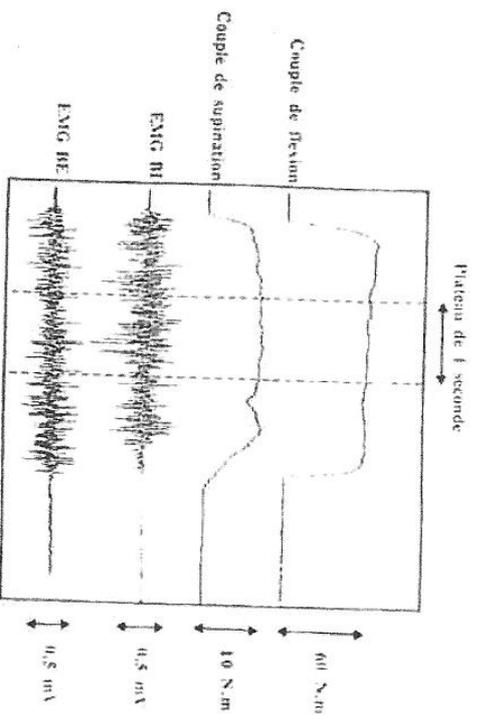


Figure 2 : Enregistrement de l'activité électromyographique (EMG) de surface du biceps interne (BI) et du biceps externe (BE) lors d'une contraction volontaire isométrique maximale bidirectionnelle (F+S).

RÉSULTATS

Lors de la réalisation d'efforts combinés où F et S sont simultanément requis, l'ensemble des sujets parvient, après une séance d'apprentissage, à respecter la consigne. Le contrôle simultané de 2 indices mécaniques est un contrôle de type double tâche. L'utilisation de l'oscilloscope en mode XY permet de minimiser la prise d'information tout en permettant le double ajustement des couples développés.

SIMPLE OU DOUBLE TÂCHE : EFFETS SUR LES NIVEAUX DE COUPLES ET D'EMG

Nous nous proposons dans un premier temps de confirmer le bien-fondé de notre hypothèse de travail en étudiant l'influence de la nature de la tâche sur les niveaux de couples et d'EMG observés avant entraînement. Pour normaliser les résultats, chacun des paramètres étudiés (couples, EMG) est exprimé en % de sa valeur maximale rencontrée au test 1 tous efforts confondus (F, S, F+S).

Couples

L'analyse des valeurs normalisées des couples de flexion et de supination détectés lors de la réalisation, avant entraînement (test 1), d'efforts isométriques volontaires maximaux de F, S et F+S, fait ressortir que le couple maximal de flexion est toujours rencontré en tâche monofonctionnelle (F) (figure 3a). C'est en fonctions associées (F+S) que la plupart des sujets parviennent à développer leur couple maximal de supination tout en lui associant 72 % du couple maximal de flexion. En S, le couple de supination atteint représente 94 % de la valeur maximale observée en F+S. Par ailleurs, il faut souligner qu'en F seule, un couple de pronation est systématiquement détecté. Le couple involontairement associé de flexion, rencontré lorsque S est requise seule, atteint 18 % de sa valeur maximale (figure 3a).

EMG des 2 chefs du Biceps Brachial

La figure 3b représente une moyenne pour les 12 sujets des niveaux d'activation des 2 chefs du BB observés en tâches mono- (F, S) et bidirectionnelles (F+S) maximales. En tâches associées (F+S), l'activation maximale des 2 chefs est observée pour 9 des 12 sujets. Pour le BE, les niveaux d'activation observés en simple tâche (F ou S) sont proches du maximum rencontré en F+S, pour la majorité des sujets.

Pour le BI, l'activation maximale est retrouvée en F seule alors qu'en S l'activité de ce muscle est moindre (78 %) pour la quasi-totalité des sujets (9 sur 12).

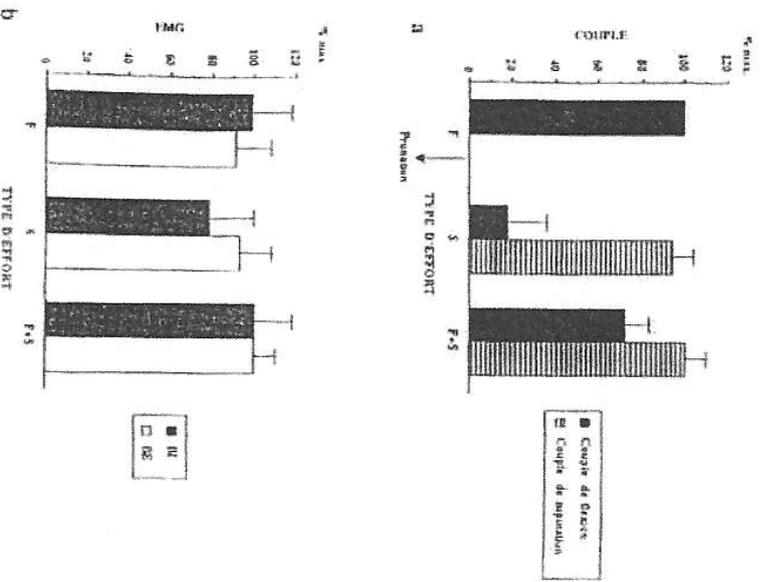


Figure 3 : Valeurs moyennes, pour 12 sujets, des couples de flexion et de supination développés (a) et des niveaux d'activité électromyographique (EMG) du Biceps Interne (BI) et du Biceps Externe (BE) lors d'efforts isométriques volontaires maximums en flexion (F), en supination (S) ou en fonctions associées (F+S). Ces valeurs sont exprimées en % de leur maximum rencontré tous efforts confondus, avant entraînement (test 1).

EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT : ANALYSE BIOMÉCANIQUE ET ÉLECTROMYOGRAPHIQUE

Pour suivre la progression dans chaque fonction, couples et EMG sont exprimés en % de la valeur maximale observée au test 1 dans la fonction (F, S, F+S). En F+S, c'est la somme des couples de flexion et de supination qui est prise comme référence (100 %).

Suivi longitudinal des performances mécaniques et électromyographiques

La figure 4 représente un exemple de suivi longitudinal, pour un sujet du groupe F, des valeurs maximales de couple et d'EMG enregistrées lors des différents tests effectués chaque semaine dans la fonction entraînée (F). Cette représentation graphique permet de suivre pour chacun des 12 sujets, la cinétique de l'évolution des performances mécaniques et électromyographiques, tout au long du programme de renforcement musculaire. Pour chaque sujet, les effets de l'entraînement sont ainsi analysés semaine à semaine, en F, en S et en F+S. Pour un même sujet et quelle que soit la fonction testée, une augmentation très distincte des niveaux maxima de l'EMG du BI et du BE est constatée (figure 4).

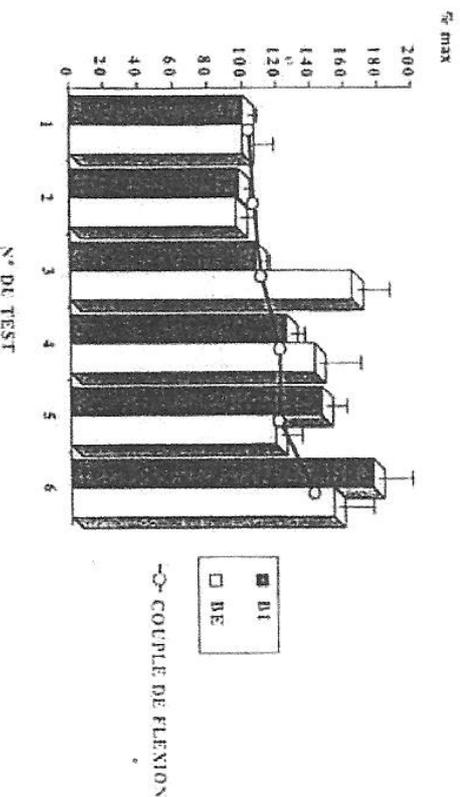


Figure 4 : Exemple, pour un sujet du groupe F, du suivi longitudinal des valeurs de couple de flexion et d'EMG du Biceps Interne (BI) et du Biceps Externe (BE) lors des différents tests hebdomadaires menés ici en flexion (F...TG) qui portent les 5 semaines d'entraînement. Le même suivi est réalisé pour ce sujet en supination et en fonctions associées.

Variations pré-post entraînement

L'amélioration des performances étant homogène pour tous les sujets d'un même groupe quelle que soit la fonction testée, le calcul de gains moyens est autorisé. Des comportements de groupe sont alors décrits selon le mode de représentation de Sale (34), qui permet de distinguer les contributions relatives des facteurs neurophysiologiques et musculaires aux gains de force observés après entraînement.

La figure 5 représente ainsi les variations pré-post entraînement de la force maximale isométrique volontaire (Force), du niveau d'activation du muscle (EMG) et du rapport EMG/Force. Ce dernier paramètre rend compte du niveau d'activation des UM du muscle pour un niveau de force donné. En effort maximal, une diminution de ce rapport après entraînement indiquerait donc que l'amélioration de la performance mécanique ne serait pas seule en cause dans l'amélioration de la performance mécanique mais que des facteurs intrinsèquement musculaires seraient également présents.

Chaque paramètre est exprimé cette fois en % de variation par rapport à la valeur maximale au test 1 dans la fonction. Pour les 2 groupes, les évolutions pré-post entraînement sont distinguées en fonction du chef musculaire étudié (BI : figure 5a ; BE : figure 5b) et pour chaque fonction testée.

Gains de force

Dans les 3 modalités testées (F, S, F+S), les 2 groupes présentent des gains de force mais avec des intensités différentes selon la fonction testée (figure 5). Pour les 2 groupes, c'est en F seule que les gains les plus faibles sont observés. Quand seule la fonction accessoire du muscle est testée (S), les gains de force sont très importants pour les sujets du groupe F+S (+60 %). Néanmoins, quoique non entrainés dans cette fonction (S), les sujets du groupe F présentent également des améliorations de la performance mécanique de supination puisqu'un gain non négligeable de +25 % est constaté dans cette fonction. C'est lorsque l'on teste les fonctions associées (F+S) que les différences entre les 2 groupes sont les moins marquées. En effet, l'importance de l'amélioration de la performance mécanique (+43 %) pour les sujets du groupe F+S, quand on teste la fonction entraînée (F+S), s'observe également et de façon très nette (+35 %) pour les sujets du groupe F.

Gains d'EMG

Pour les 2 groupes, à l'exception du BE des sujets du groupe F testés en S (-6 %), des gains EMG sont constatés quelle que soit la fonction testée et le chef musculaire étudié. Au niveau du chef externe du Biceps, les gains observés pour les 2 groupes restent cependant nettement inférieurs (figure 5b) à ceux rencontrés au niveau du chef interne (figure 5a).

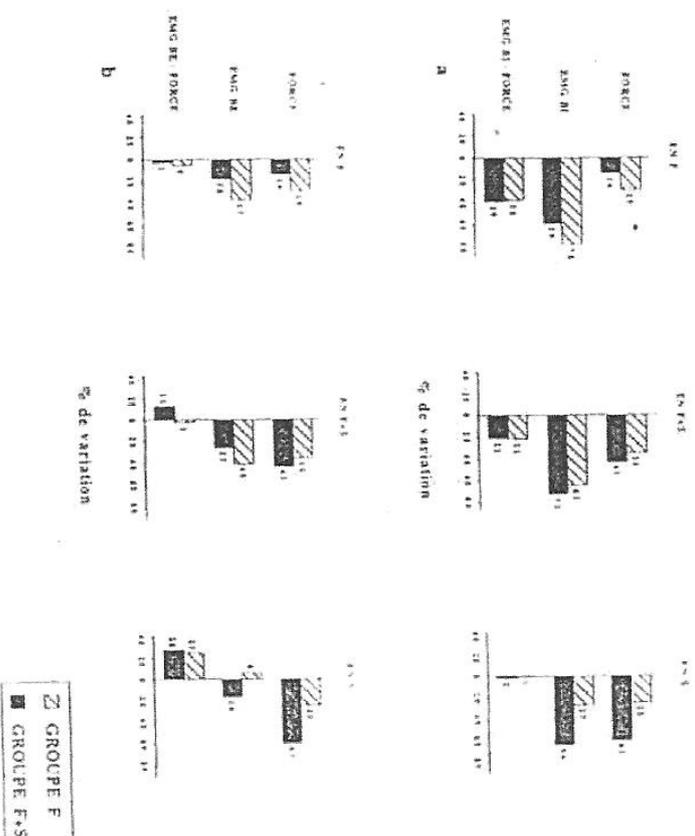


Figure 5. Effets d'un entraînement de courte durée en simple (groupe F, N=6) ou double tâche (groupe F+S, N=6) sur la force maximale volontaire isométrique de flexion (F), de supination (S) ou de flexion et supination simultanément associées (F+S). Les résultats représentent les moyennes calculées pour 6 sujets dans chaque groupe entraîné. Les variations pré-post entraînement sont distinguées pour les chefs interne (BI), a et externe (BE), b du Biceps.

EMG) est le reflet du niveau d'activation du muscle. Le rapport EMG / Force représente le niveau d'activation des Unités Motrices observé pour un niveau de force maximal.

En effet, l'amélioration de la commande du BI est très marquée pour l'ensemble de la population entraînée et ce, quelle que soit la fonction testée. Pour ce chef musculaire, il faut par ailleurs noter une spécificité de l'entraînement : l'augmentation de la performance EMG étant d'autant plus marquée quand la fonction testée est celle de l'entraînement (+78 % en F pour le groupe F contre +65 % en F+S ; +73 % en F+S pour le groupe F+S contre +59 % en F) (figure 5a). Lorsque l'on teste seule la fonction accéssoire du muscle (S), le bénéfice de l'entraînement en bifonction est considérable au regard des résultats obtenus par les sujets entraînés en monofonction. En effet, en S, les gains d'EMG du BI sont très importants (+64 % pour le groupe F+S contre +27 % pour le groupe F) ; les gains observés au niveau du BI, quoique nettement plus faibles, restent supérieurs à ceux constatés pour le groupe F (+16 % pour le groupe F+S contre -6 % pour le groupe F).

Rapport EMG / Force

Pour le BI, c'est en S que les rapports les plus faibles sont observés (-25 % pour le groupe F et -38 % pour le groupe F+S). En F ou en F+S, ces mêmes rapports varient peu (de +3 à +6 %) voire diminuent (-13 % pour le groupe F+S dans la fonction entraînée) (figure 5b).

Pour le BI et pour les 2 groupes, l'évolution des rapports EMG / Force avec l'entraînement est toujours positive (figure 5a), même si en S les variations du rapport sont faibles. Quelle que soit la fonction testée, ce rapport présente le même pourcentage de variation pour les 2 groupes. Les gains de force dans chacune des 3 modalités testées sont systématiquement accompagnés d'une augmentation en proportion plus importante des niveaux EMG du BI. Ceci illustre de façon très nette lorsque l'on teste la flexion seule où les rapports atteignent des pourcentages de variation de +38 % pour le groupe F et de +39 % pour le groupe F+S, mais aussi lorsque les 2 fonctions sont simultanément requises (+22 % pour le groupe F et +21 % pour le groupe F+S).

DISCUSSION

EFFETS DE LA NATURE DE LA TÂCHE SUR LES NIVEAUX DE COUPLES ET D'EMG

Couples

De l'analyse des couples de flexion et de supination, il ressort que c'est en tâches associées que la majorité des sujets parviennent à développer leur couple maximal de supination, tout en lui associant un couple de flexion égal à 72 % du maximum rencontré en tâche unidirectionnelle (F). L'effet mécanique « facilitateur » de la double tâche sur le couple maximal de supination n'est donc pas retrouvé pour le couple maximal de flexion. En S, où le sujet est laissé libre de sa stratégie, le couple de supination atteint est proche du maximum détecté en F+S. La somme des couples en double tâche est très largement supérieure à celle observée dans chaque tâche unidirectionnelle. La réalisation de tâches bidirectionnelles n'est donc pas globalement préjudiciable à la performance mécanique demandée.

Ces résultats recoupent en partie les observations faites par d'autres auteurs (6, 10, 20) montrant notamment en double tâche une chute du couple de flexion de 20 % (20) voire 50 % (6) par rapport à la valeur maximale trouvée en F seule. La diminution, certes très peu marquée en double tâche du couple maximal de supination, telle que décrite récemment par Jamison et Caldwell (20) n'est pas constatée dans notre étude. Au contraire, les niveaux de couple de supination atteints en F+S sont maximaux. Il faut cependant souligner ici que les conditions expérimentales de ces auteurs diffèrent sensiblement des nôtres. En effet, des différences de ces auteurs diffèrent sensiblement des nôtres. En effet, des différences sont constatées tant au niveau des positions articulaires (main en semi-pronation ; épaule en abduction à 45°) qu'au niveau des consignes données aux sujets : la double tâche consistant par exemple pour Jamison et Caldwell (21) à développer d'abord un effort maximal de supination et puis à lui associer un effort maximal de flexion. En simples tâches, ces auteurs imposent par ailleurs aux sujets de maintenir à 0 N.m de la compo-sante associée, étudiant ainsi nécessairement des stratégies motrices différentes. Dans le cadre de notre étude, la consigne en double tâche était d'associer simultanément et maximallement F et S, alors qu'en simples tâches, la composante involontairement associée était libre de s'exprimer, notre souhait étant de s'approcher des conditions de geste naturel. Ainsi, en S, un couple de flexion est généralement détecté alors qu'en F et pour tous les sujets, c'est une pronation qui est cette fois involontairement associée. Il semble par ailleurs que cette composante associée de pronation dépende de la position de la main puisque ce résultat ne correspond pas

à celui observé classiquement et encore récemment dans nos précédents travaux (32) pour une position de la main à 0°. En effet, c'est un couple de supination et non de pronation qui était alors systématiquement associé au couple de flexion requis. Le positionnement à 45° de la main au cours de cette étude a été choisi pour mieux correspondre à celui adopté le plus couramment en rééducation.

EMG

La comparaison des niveaux d'activité du Biceps Interne (BI) et du Biceps Extérieur (BE) en simple ou double tâche montre essentiellement pour l'ensemble des sujets que c'est en tâches associées que les 2 chefs sont simultanément maximalement mis en jeu. Cette observation se retrouve dans les résultats obtenus par Caldwell et Van Leeuwen (6) et par Hébert et al. (17) qui considèrent l'activité globale du BB au cours des mêmes efforts. Plus récemment, cette suractivation a été confirmée pour les 2 chefs du BB (20).

La plus forte participation du BE aux efforts de supination, constatée encore récemment lors de travaux menés dans notre laboratoire (32), n'est pas corroborée ici par nos résultats. En effet, l'activité du chef externe du BB varie peu d'un type d'effort à l'autre. Par ailleurs, on constate une activation plus faible du BI en S qu'en F. Cette divergence apparente des résultats peut s'expliquer en partie par une position différente de la main sollicitant des coordinations musculaires probablement différentes.

EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT

Soumis à un régime de renforcement musculaire, le muscle s'irrite quelque peu par une adaptation. Cette adaptation peut se manifester par des changements morphologiques importants (exemple : bodybuilders). Quoi qu'il en soit, il est possible d'augmenter la force maximale volontaire (FMV) sans changer la surface de section transversale du muscle (28). Cette observation souligne le fait que la FMV telle qu'elle est mesurée classiquement au niveau d'une articulation, en condition isométrique, constitue la mesure la plus simple de la performance motrice mais résulte d'une interaction complexe de différents facteurs : neuroaux, musculaires et mécaniques (13). Les facteurs neuroaux concernent les mécanismes de recrutement des Unités Motrices (UM) du muscle et la modulation de leur fréquence de décharge. Les facteurs musculaires ont trait à la taille et à la longueur du ou des muscles impliqués. Enfin, par facteurs mécaniques, on entend des facteurs tels les bras de levier associés aux différentes forces requises.

L'adaptation du muscle et de ses UM au type d'entraînement qu'il subit met en jeu ces différents facteurs.

Pendant la phase initiale de l'entraînement, l'augmentation de la FMV serait essentiellement attribuée à une augmentation du niveau EMG du principal agoniste (pour la flexion du coude, le BB). Puis s'installent un processus d'hypertrophie des fibres musculaires, perceptible par une diminution du rapport EMG/Force.

Si l'on admet une bonne reproductibilité des mesures électromyographiques (28), il est alors possible de quantifier les contributions relatives des facteurs neurophysiologiques et musculaires aux gains de force observés après entraînement.

La réalisation de doubles tâches (F+S) conduisant à une suractivation du BB, nous nous attendions à tirer profit de ce bénéfice tout au long du programme de renforcement musculaire puisque l'efficacité de ce programme dépend essentiellement de sa capacité à recruter un nombre maximum d'UM. Attendu dans la fonction entraînée (F+S), ce bénéfice devrait ainsi largement s'étendre aux fonctions non entraînées seules (F et S). Nos résultats indiquent essentiellement que sur le plan mécanique, l'amélioration des performances est plus importante, globalement, pour les sujets du groupe F+S. Ces sujets profitent très largement de l'entraînement sollicitant la fonction accessoire du muscle, puisqu'en S la FMV de supination augmente de 60%. Il faut cependant constater que pour le groupe F, le renforcement s'illustre également en S, fonction pourtant non entraînée. Ce résultat souligne l'impossibilité de dissocier totalement les fonctions principale et accessoire du muscle bifonctionnel.

Sur le plan électromyographique, pour chaque groupe, un renforcement plus marqué du chef interne du Biceps est constaté. Ce renforcement est plus important dans la fonction entraînée, ce qui traduit une spécificité de l'entraînement, c'est-à-dire l'adaptation du programme motric à la modalité entraînée. C'est vis-à-vis de l'effort de supination que les différences observées entre les 2 groupes au niveau du BI sont les plus importantes : les sujets du groupe F+S profitent très largement de l'entraînement sollicitant la fonction accessoire du muscle. Il est donc clair que le renforcement du chef interne du Biceps est plus étendu par l'entraînement en bifonction puisqu'il atteint de manière très prononcée les 3 fonctions testées.

Le renforcement du BE est sensiblement plus complexe à analyser. Ce muscle présente comme attendu une adaptation de la commande avec l'entraînement. Cette adaptation se retrouve pour les 2 groupes en F et en F+S, quoique plus faiblement pour le groupe F+S. En revanche, seul le groupe F+S présente, après entraînement, une plus forte activation du BE

en S. Cependant, comme l'indique la valeur négative du rapport EMG/Force, cette adaptation ne rend pas bien compte du gain de force de supination. Ce résultat confirme bien que le bénéfice en S est à mettre au crédit du chef interne du Biceps.

CONCLUSION

L'ensemble de ce travail démontre l'intérêt de la prise en compte du caractère plurifonctionnel des muscles dans l'élaboration de programmes de renforcement musculaire. Pour un muscle bifonctionnel tel le Biceps Brachial, la réalisation de tâches associant simultanément les fonctions principale et accessoire du muscle conduit à une suractivation de l'effeteur musculaire qu'il est possible de mettre à profit au cours d'un programme de renforcement.

L'amélioration des performances motrices du Biceps Brachial, consécutive à un entraînement de courte durée en double tâche, est observée dans la fonction entraînée (F+S) mais s'étend largement aux fonctions non entraînées seules (F et S). Pour les deux chefs, le bénéfice apporté par l'entraînement en bifonction est net lorsque seule la fonction accessoire du muscle est sollicitée. Ce bénéfice est néanmoins plus marqué au niveau de la courte portion du Biceps. Le renforcement s'opère donc différemment selon le chef musculaire étudié, ce qui par ailleurs reste vrai pour l'entraînement en monofonction. Ce dernier résultat suggère, au moins pour la phase statique de la rééducation, qu'il faut adapter le programme de renforcement en fonction de la localisation supposée du déficit fonctionnel.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé, en partie, grâce à l'attribution de recherches accordée par le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais.

RÉFÉRENCES

- [1] BASMAJIAN JV : *Muscles alive. Their functions revealed by electromyography*. Baltimore, 2nd éditi. The Williams and Wilkins Company edit., 1967, 1 vol., 421 p.
- [2] BINDER MD : Changing perspectives on the functional organization of the segmental motor system. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 1986; 64 : 495-498.
- [3] BUCHANAN TS, ALMDALE DJL, LEWIS JL et RYMER WZ : Characteristics of synergic relations during isometric contractions of human elbow muscles. *J. Neurophysiol.* 1986; 56 : 1225-1241.
- [4] BUCHANAN TS, ROVAL GP et RYMER WZ : Strategies for muscle activation during isometric torque generation at the human elbow. *J. Neurophysiol.* 1989; 62 : 1201-1212.
- [5] BURKE RE : *Motor Units : anatomy, physiology and functional organization*. Bethesda, in Handbook of physiology, 1981, Sect. 1, Vol. 11, pt 1. The nervous system. *Am. Physiol. Soc.* 3:15-122.
- [6] CALDWELL GE et VAN LEMPUTTE M : Elbow torques and EMG patterns of flexor muscles during different isometric tasks. *Electromyogr. clin. Neurophysiol.* 1991; 31 : 433-445.
- [7] CALDWELL GE, JAMISON JC et HEE S : Amplitude and frequency measures of surface electromyography during dual task elbow torque production. *Int. J. Appl. Physiol.* 1993; 66 : 349-356.
- [8] GNOKKABET JC, LENSEL G et PERTUZON E : Relative contribution of individual muscles to the isometric contraction of a muscular group. *J. Biomechanics* 1975; 8 : 191-197.
- [9] DE LEON R, HODGSON JA, ROY RR et EDGERTON VR : Extensor- and flexor-like modulation within motor pools of the rat hindlimb during treadmill locomotion and swimming. *Brain Res* 1994; 654 : 241-250.
- [10] DE SERRES SJ, HERBERT LJ et ARSENAULT AB : Effect of pronation and supination tasks on elbow flexor muscles. *J. Electromyogr. Kinesiol* 1992; 2 : 53-58.
- [11] DUCHENNE DE BOULOGNE GB : *Physiologie des mouvements*. Paris, Baillière et fils, 1867, 1 vol., 872 p.
- [12] ENGLISH AW, et WEEKS OJ : Compartmentalization of single muscle units in cat lateral gastrocnemius. *Exp. Brain Res* 1984; 50 : 361-368.
- [13] ENOKA RM : Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Medicine*, 1988; 6 : 146-168.
- [14] GAMET D et VANHOUTTE C : Un logiciel pour la quantification en temps réel de l'activité électrique musculaire : SIPATOL. *Les actes des colloques de l'INSEP* (Colloque Sport et Informatique, Paris, 1993, pp 22

- [15] GERBEAUX M, LENSEL-CORBEIL G et PERTUZON E : *Exploration des mouvements : principes de conception d'un ergomètre. Pratiques sportives et modélisation du geste*. Nogier et Bianchi Ed., 1990 : 377-394.
- [16] GORDON DC, LOEB GE ET RICHMOND FIR : Distribution of motoneurons supplying cat sartorius and tensor fasciae latae, demonstrated by retrograde multiple-labelling methods. *J Comp Neurol* 1991; 304 : 357-372.
- [17] HERBERT LJ, DE SERRES SJ et ARSENAULT AB : Cocontraction of the elbow muscles during combined tasks of pronation-flexion and supination-flexion. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1991; 31 : 483-488.
- [18] HENNEMAN E et OLSON CB : Relations between structure and function in the design of skeletal muscles. *J Neurophysiol* 1965; 28 : 581-598.
- [19] HOFFER JA, LOEB GE, SUGANO N, MARKS WB, O'DONOVAN MJ, et PRATT CA : Cat hindlimb motoneurons during locomotion. III. Functional segregation in sartorius. *J Neurophysiol* 1987; 57 : 554-562.
- [20] JAMISON JC et CALDWELL GE : Muscle synergies and isometric torque production : influence of supination and pronation level on elbow flexion. *J Neurophysiol* 1993; 70 : 947-960.
- [21] JAMISON JC et CALDWELL GE : Dual degree of freedom tasks : flexion effect on supination/pronation response. *J Electromyogr Kinesiol* 1994; 4 : 143-152.
- [22] JONGEN HAIL, DENIER VAN DER GON JJ et GIELEN CCAM : Activation of human arm muscles during flexion/extension and supination/pronation tasks : a theory on muscle coordination. *Biol Cybern* 1989; 61 : 1-9.
- [23] KAPANDJI IA : *Physiologie articulaire* [schémas commentés de mécanique humaine]. Paris, FASC. II : membre supérieure [4^e éd.], Maloine S.A., 1966, 1 vol., 234 p.
- [24] KENDALL HO, KENDALL FP et WADSWORTH GE : *Les muscles : bilan et étude fonctionnelle*. Paris, Maloine S.A., 1974, 1 vol., 284 p.
- [25] LOEB GE : Motoneurone task groups : coping with kinematic heterogeneity. *J Exp Biol* 1985; 115 : 137-146.
- [26] McMILLAN AS : Task-related behaviour of motor units in the human temporalis muscle. *Exp Brain Res* 1993; 94 : 336-342.
- [27] MILLER C : *Effets comparés de deux méthodes d'entraînement sur le développement de la force musculaire : électrostimulation et contraction volontaire*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Orsay, 194 p.
- [28] MORTANI T et DE VRIES HA : Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med* 1979; 58 : 115-135.
- [29] MORTANI T : Neuromuscular adaptations during the acquisition of muscle strength, power and motor tasks. *J Biomech* 1993; 26 : 95-107

- [30] PATON ME et BROWN MM : An electromyographic analysis of functional differentiation in human pectoralis muscle. *J Electromyogr Kinesiol* 1991; 4 : 161-169.
- [31] PEROT C, GAILLARD P et GOUBEL F : Task dependent behaviour of a bifunctional muscle : an approach by spectral analysis of surface EMG. *J Biophys Biomec* 1987; 11 : 99-103.
- [32] PEROT C, ANDRE L, DUPONT L et VANHOUTTE C : Contribution of either head of the biceps brachii in single or dual isometric ramp contractions. *J Electromyogr Kinesiol* 1995 [à paraître].
- [33] ROLVIERE H : *Anatomie humaine descriptive et topographique*. Paris, Masson Ed., 1948, 3 vol.
- [34] SALE DG : Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 1988; 20 : S135-S145.
- [35] SEGAL RL : Neuromuscular compartments in the human biceps brachii muscle. *Neuroscience Letters* 1992; 40 : 98-102.
- [36] TER HAAR ROMENY BM, DENIER VAN DER GON JJ ET GIELEN CCAM : Changes in recruitment order of motor units in the human biceps muscle. *Exp Neurol* 1982; 78 : 360-368.
- [37] TER HAAR ROMENY BM, DENIER VAN DER GON JJ ET GIELEN CCAM : Relation between location of motor unit in the human biceps brachii and its critical firing levels for different tasks. *Exp Neurol* 1984; 85 : 631-650.
- [38] THEELEN WEN M, GIELEN CCAM, MILLER LE et DOORENBOSCH C : The relation between the direction dependence of electromyographic amplitude and motor unit recruitment thresholds during isometric contractions. *Exp Brain Res* 1994; 98 : 488-500.
- [39] VAN ZUYLEN EJ, GIELEN CCAM et DENIER VAN DER GON JJ : Coordination and inhomogeneous activation of human arm muscles during isometric torques. *J Neurophysiol* 1988; 60 : 1523-1548.
- [40] WERKS OJ et ENGLISH AW : Central organization of cat lateral gastrocnemius motor units. *Soc Neurosci Abstr* 1982; 8 : 959.
- [41] WOLF SL, SEGAL RL et ENGLISH AW : Task-oriented EMG activity recorded from partitions in human lateral gastrocnemius muscle. *J Electromyogr Kinesiol* 1993; 3 : 87-94.