Journal de la Société de Biologie, 194 (3-4), 171-176 (2000)

Effets d'une séance d'exercices excentriques sur la récupération à court terme de la contractilité musculaire

par Anne Michaut, Michel Pousson, Yves Ballay, Jacques Van Hoecke

Groupe Analyse du Mouvement (GAM), UFR STAPS,
Campus universitaire, Université de Bourgogne, BP 27877, 21078 Dijon Cedex.

Reçu le 9 octobre 2000

RÉSUMÉ

Les effets à court terme de 5 séries de 10 contractions maximales excentriques des fléchisseurs du coude, réalisées sur un ergomètre isocinétique, sont étudiés. Le moment maximal excentrique, isométrique, concentrique, l'activité myoélectrique des biceps et triceps brachii, le niveau d'activation volontaire, l'amplitude de la réponse M, l'amplitude de la secousse, les vitesses maximales de contraction et de relaxation sont mesurés avant (Témoin), 2 minutes après (Post), 24 heures (Post24h) et 48 heures (Post48h) après la séance d'exercice.

Le moment est significativement diminué de Témoin à Post48h, quel que soit le mode de contraction, excepté le moment concentrique mesuré à 240°.s^{-1}, qui récupère sa valeur Témoin à Post48h. Le niveau d'activation est significativement réduit à Post (p < 0,05), puis retrouve sa valeur Témoin à Post24h. L'amplitude de la secousse, ainsi que les vitesses maximales de contraction et de relaxation sont significativement diminuées pendant toute la période de mesure (p < 0,01). L'amplitude de la réponse M n'a pas été modifiée à la suite de la séance. Ces résultats montrent que, pendant une période de récupération de 48 heures, la diminution du moment est principalement due à une atteinte périphérique du système neuro-musculaire, et que la récupération de la force doit être étroitement liée à la valeur de force développée.

SUMMARY Eccentric exercise session effects on muscular contractility short term recovery

Short term effects of 5 sets of 10 maximal eccentric contractions of the elbow flexors, performed using an isokinetic ergometer, were studied. Maximal eccentric, isometric, concentric torque, myoelectrical activity of biceps and triceps brachii, voluntary activation, M-wave amplitude, as well as twitch and maximal contraction and relaxation velocities were measured before (Control), 2 minutes after (Post), 24 hours (Post24h) and 48 hours (Post48h) after the exercise session.

Torque significantly decreased over the recovery period, whatever the contraction type, excepted concentric torque assessed at 240°. s^{-1} which recovered its Control value at Post48h. Activation level significantly decreased at Post (p < 0.05) and returned to its Control value at Post24h. Twitch, as well as maximal contraction and relaxation velocities had significantly declined among the experimental procedure (p < 0.01). M-wave amplitude was not modified after the exercise. These results indicate that, over a 48 hour rest period, torque decrement following a maximal eccentric exercise session should mainly be due to a failure of the peripheral part of the neuromuscular system, and force recovery should closely be linked to the developed force value.

INTRODUCTION

Un exercice musculaire intense induit généralement une diminution de la force (Gibala et al., 1995 ; Kawakami et al., 1993 ; Komi et Viitasalo, 1977). Les différents sites impliqués dans la production de la force, du système nerveux central jusqu'aux ponts actine-myosine peuvent être altérés par un exercice musculaire d'intensité élevée, et les caractéristiques de l'exercice déterminent leur degré d'altération (Fuglevand et al., 1993). Une fatigue centrale et/ou périphérique peut être responsable de la diminution de la force. La fatigue centrale

peut être caractérisée par la défaillance dans le recrutement des unités motrices et/ou dans la fréquence de décharge des unités actives (Green, 1987), alors que la fatigue périphérique pourrait être pour partie liée à l'altération du couplage excitation-contraction. D'après Merton (1954), l'utilisation de la technique de *twitch interpolation* permettrait l'évaluation de la fatigue centrale. Cette technique consiste à surimposer une stimulation électrique percutanée du nerf moteur à une contraction maximale volontaire, et permet de quantifier le niveau d'activation volontaire. La mesure de l'activité myoélectrique des muscles en contraction apporte des indications sur la qualité de la commande nerveuse, et reflète à la fois le fonctionnement des structures nerveuses « centrales » et celui des structures musculaires « périphériques » (Ebenblicher et al., 1998). La fatigue périphérique peut être évaluée à partir d'une stimulation électrique supramaximale du muscle au repos. D'après Fuglevand et al. (1993), la réponse mécanique ainsi obtenue permettrait d'évaluer la propagation neuromusculaire, le couplage excitation-contraction, et le fonctionnement des ponts actine-myosine. La propagation neuromusculaire peut également être évaluée à partir de l'enregistrement de la dépolarisation induite par une stimulation cutanée, ou réponse M.

La mesure de ces paramètres conduit donc à la détermination des principales causes de la diminution de la force induite par un exercice musculaire. Par ailleurs, la réduction de la force semble être déterminée par la nature de l'exercice (Komi et Viitasalo, 1977 ; Tesch et al., 1990). Les actions excentriques, isométriques et concentriques sont en de nombreux points différentes. Par exemple, la contraction excentrique permet de développer un niveau de force plus important que la contraction isométrique et concentrique (voir Kellis et Baltzopoulos, 1995). De plus, la demande énergétique associée à une contraction concentrique est supérieure à celle d'une contraction isométrique, elle même supérieure à celle d'une contraction excentrique (Ryschon et al., 1997). Les modalités de chaque type de contraction pourraient influencer le délai de récupération de la force. D'ailleurs, après un exercice excentrique, la récupération complète du moment maximal mesuré en condition concentrique à une vitesse angulaire de $90°.s^{-1}$ est apparue 3 jours après l'exercice, alors que le moment maximal isométrique demeurait diminué (Friden et al., 1983).

Ainsi nous tenterons de mettre en évidence les principaux facteurs impliqués dans la diminution de la force induite par une séance d'exercices excentriques, réalisée à intensité maximale. Nous essaierons également de démontrer qu'il existe une dépendance entre la récupération de la force et le mode de sollicitation musculaire.

SUJETS, MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sujets

Onze garçons, étudiants en éducation physique, n'ayant souffert d'aucune pathologie du coude (moyenne (écart type : 21,00±1,48 ans ; 181,82±9,05 cm ; 74,91 ± 6,66 kg) ont participé à cette étude. Un consentement écrit a été obtenu de chaque sujet dans la période précédant l'expérimentation, et le protocole réalisé a respecté la déclaration d'Helsinki.

Mesure du moment de force

Les mesures de moment de force sont réalisées sur un ergomètre isocinétique de type Biodex (Biodex System 3, corporation, Shirley, NY, Etats-Unis), qui enregistre le moment de force instantané à une vitesse angulaire constante déterminée (Taylor et al., 1991). Ce dynamomètre isocinétique permet de réaliser des actions musculaires concentriques, excentriques et isométriques. Le sujet est assis avec le bras et l'avant bras droit placés dans un plan horizontal. L'avant bras est maintenu dans une position neutre entre la pronation et la supination. L'axe épichondyle-épitrochlée est placé dans le prolongement de l'axe du moteur. L'extension complète de l'articulation correspond à la position angulaire 0°, et l'amplitude du mouvement est de 120°. Lors des actions excentriques, le bras est ramené passivement à l'angle de 120°, et à l'angle de 0° lors des actions concentriques. Dans ces conditions, le moment à angle constant est enregistré à 60° aussi bien en conditions dynamiques qu'isométriques.

Mesure de l'activité myoélectrique

Pendant chaque action musculaire, l'activité électromyographique (EMG) des muscles biceps brachii (BB) et triceps brachii (TB) est enregistrée par l'intermédiaire d'électrodes de surface. Les électrodes EMG, adhésives, composées de chlorure d'argent et présentant un diamètre de 8 mm ont été placées sur la peau au niveau du ventre des muscles BB et TB, la distance inter-électrode (centre à centre) étant de 2 cm. La peau a été au préalable poncée à l'aide de matériaux abrasifs et dégraissée par un mélange alcool-éther-acétone afin de diminuer la résistance inter-électrodes (impédance inférieure à 2 000 Ω). Une électrode placée sur le poignet gauche a servi de référence. Le signal EMG est amplifié avec une bande passante comprise entre 1,5 Hz et 2,0 kHz (CMRR = 90db ; impédance d'entrée = 100 MΩ ; gain 1 000). La fréquence d'échantillonnage des signaux est de 2 000 Hz. La quantification de l'EMG globale est réalisée à l'aide d'un paramètre relatif à l'évolution temporelle du signal. Ce paramétrage consiste à calculer sur un intervalle de temps T, la valeur Root Mean Square (RMS). En conditions dynamiques, les signaux EMG sont analysés sur une amplitude de 20° autour de l'angle de 60°. Les valeurs de RMS mesurées lors de contractions dynamiques sont normalisées par rapport à la valeur de RMS obtenue en condition concentrique à $60°.\ s^{-1}$ avant l'exercice. En conditions isométriques, les signaux EMG sont analysés sur une période de 0,5 s, et les valeurs RMS sont normalisées par rapport à la valeur RMS obtenue lors d'une contraction maximale isométrique avant l'exercice. Des contractions maximales isométriques et dynamiques ($60°.\ s^{-1}$) lors desquelles le TB est agoniste,

sont réalisées avant l'exercice afin de normaliser les valeurs de RMS du TB lorsqu'il est mobilisé comme antagoniste.

Mesure du niveau d'activation, de la secousse, et de la réponse M

L'estimation du niveau d'activation musculaire a été réalisée en utilisant la méthode de *twitch interpolation* développée par Merton (1954). Cette technique est basée sur la surimposition de chocs électriques lors de contractions isométriques maximales volontaires. Pour une stimulation percutanée supramaximale du nerf moteur, les réponses mécaniques de l'ensemble des muscles sollicités sont enregistrées. Les impulsions sont de type rectangulaire (1 ms, 400 V) et sont délivrées par un stimulateur de type Digitimer DS7 (Hertfordshire, England). L'anode, formée par une petite sphère de tungstène, était située au niveau du nerf musculo-cutané. La cathode (10 cm × 5 cm), auto-adhésive, était située au niveau de l'acromion claviculaire. L'intensité des impulsions, induisant une réponse mécanique maximale, a été déterminée et variait de 100 à 200 mA selon les sujets. Les stimulations sont surimposées à des contractions maximales isométriques du biceps brachii réalisées à un angle de 60°. Des stimulations sont également délivrées sur le muscle au repos. Le calcul du niveau d'activation volontaire est effectué en utilisant la formule suivante :

$$\text{Niveau d'activation (\%)} = \left[1 - \left(\frac{\textit{amplitude de la secousse surimposée}}{\textit{amplitude de la secousse au repos}}\right)\right] \times 100$$

L'amplitude de neufs secousses évoquées sur le muscle au repos (Pt; N. m) sont enregistrées et moyennées, et leurs vitesses maximales de contractions (+dPt/dt ; $N.m.s^{-1}$) et de relaxation (– dPt/dt ; $N.m.s^{-1}$) sont calculées par dérivation du signal du moment.

La dépolarisation induite par la stimulation électrique, ou réponse M, est également analysée. L'amplitude pic à pic de la réponse M (V) permet l'évaluation de la propagation des potentiels d'action au niveau de la jonction neuro-musculaire, et sa durée pic à pic (ms) correspond à la vitesse de propagation des potentiels d'action.

Protocole expérimental

Chaque sujet réalise une séance d'exercices excentriques des fléchisseurs du coude droit et quatre sessions de tests. Les sujets sont familiarisés avec l'appareillage durant la semaine précédant le début du protocole expérimental. Un échauffement standardisé comprenant des contractions sous-maximales et des étirements est effectué avant chaque session de tests. La première session de test (Témoin) est réalisée juste avant la séance d'exercice et les trois autres sont effectuées 2 minutes (Post), 24 heures (Post24h) et 48 heures (Post48h) après la séance d'exercices. Le moment maximal excentrique (– 60°.s^{-1}), concentrique (60°.s^{-1} ; 240°.s^{-1}) et isométrique (0°.s^{-1}), ainsi que l'EMG des muscles biceps et triceps brachii correspondants sont mesurés et moyennés sur les deux meilleurs essais parmi les trois réalisés. Le niveau d'activation volontaire, les caractéristiques de temps et d'amplitude de la réponse M, ainsi que les paramètres de moment et de vitesse de contraction et de relaxation de la secousse sont également mesurés.

La séance d'exercices est constituée de 5 séries (de S1 à S5) de 10 contractions maximales excentriques réalisées sur un ergomètre isocinétique à une vitesse angulaire de – 60°. s^{-1}, avec une période de récupération de 1,5 minute entre chaque série. La valeur moyenne de moment des trois premières répétitions de la première série (S1Pré) et des trois dernières répétitions de chaque série, ainsi que l'EMG du BB et du TB correspondants sont calculés.

Analyse statistique

Une analyse de la variance à un facteur contrôlé (ANOVA) avec mesures répétées est utilisée pour comparer les modifications des valeurs de moment, de BB et TB RMS entre les séries de l'exercice. Les variations des valeurs de moment, de BB et TB RMS, du niveau d'activation, des paramètres de la réponse M et de la secousse, ainsi que des vitesses maximales de contraction et de relaxation entre les différentes sessions de test sont déterminées en utilisant une ANOVA à un facteur contrôlé. Quand les valeurs de F sont significatives, une analyse post-hoc de Newman-Keuls est effectuée afin de déterminer les principaux effets, avec un seuil de significativité à $p < 0{,}05$.

RÉSULTATS

La séance d'exercices

Le moment diminue de manière significative pendant les cinq séries de la séance d'exercice par rapport à S1Pré (F = 28,40 ; $p < 0{,}01$). La valeur de moment à S1Pré est égale à 76,69 ± 12,40 N.m et diminue de 10,68 ± 9,47 % à S1 et de 26,53±11,34 % à S5 ($p < 0.01$). BB RMS ne varie pas durant la séance d'exercice (0,85 ± 0,22 unités arbitraires (ua) à S1Pré et 0,86 ± 0,39 ua à S5). Et TB RMS augmente à S5 (0,40 ± 0,14 ua) par rapport à S1Pré (0,37 ± 0,14 ua ; F = 2,70 ; $p < 0{,}05$).

Récupération et moment

Le moment excentrique développé – 60°. s^{-1} a significativement diminué à Post et représente 77,67 ± 8,14 % de sa valeur Témoin, puis 68,93 ± 12,33 % à Post24h et 72,98 ± 13,15 % à Post48h (F = 30,42 ; $p < 0.01$) (Tableau 1).

Par rapport à sa valeur Témoin, le moment maximal isométrique est égal à 79,23 ± 11,19 % à Post, 86,63 ± 11,89 % à Post24h et 91,51 ± 15,54 % à Post48h (F = 16,85 ; $p < 0{,}01$). Le moment concentrique développé à 60°. s^{-1} représente 81,5 ± 6,14 % de sa valeur Témoin à Post, 81,06 ± 13,07 % à Post24h et 83,19 ± 14,56 % à Post48h (F = 11,03 ; $p < 0{,}01$). Il est à noter que le moment concentrique mesuré à 240°. s^{-1} retourne à sa valeur Témoin à Post48h (92,97 ± 19,31 %), alors qu'il était diminué de manière significative à Post (85,79

TABLEAU I. – Evolution du moment excentrique, isométrique et concentrique avant l'exercice (Témoin), immédiatement (Post), 24 heures (Post24h) et 48 heures après (Post48h) l'exercice.

	Témoin	Post	Post 24 h	Post 48 h
– 60°. s^{-1}	85,17 ± 14,98	66,11 ± 13,57 *	58,19 ± 11,37 *	61,62 ± 12,36 *
0°.s^{-1}	65,91 ± 13,15	51,89 ± 11,15 *	56,80 ± 11,32 *	59,58 ± 11,41 *
60°.s^{-1}	50,24 ± 9,93	41,07 ± 7,83 *	40,81 ± 7,34 *	41,81 ± 6,10 *
240°.s^{-1}	37,49 ± 7,60	32,14 ± 7,45 *	29,47 ± 6,60 *	34,33 ± 7,56

Valeurs absolues exprimées en N. m ; moyenne ± écart type
* significativement différent de la valeur mesurée à Témoin ($p < 0,05$).

± 10,27 %) et Post24h (79,44±13,19 % ; F = 7,98 ; $p < 0,01$).

Récupération et EMG

Aucune variation significative de la valeur de BB RMS et de TB RMS n'est mesurée pendant la période de récupération quelle que soit la vitesse angulaire de la contraction réalisée.

Récupération et niveau d'activation volontaire, paramètres de la secousse et réponse M

Le niveau d'activation diminue de manière significative à Post (83,16 ± 12,01 % ; F = 6,04 ; $p < 0,05$) comparé à sa valeur Témoin (94,83 ± 3,83 %) et retourne à sa valeur Témoin à Post24h (87,74 ± 7,60 %). Pt a significativement diminué pendant toute la durée de l'expérimentation, et représente 40,19 ± 12,39 % de sa valeur Témoin à Post, 56,88 ± 22,54 % à Post24h et 67,78 ± 33,37 % à Post48h (F = 20,54 ; $p < 0,01$) (Figure 1).

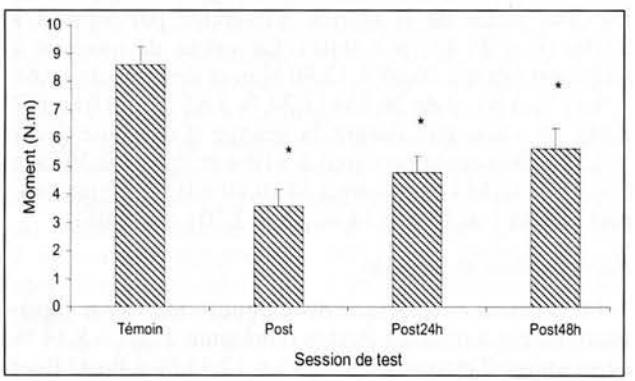

FIG. 1. – Évolution de l'amplitude de la secousse lors des différentes sessions de test (Témoin, Post, Post24h, Post48h). Valeurs exprimées en N.m ; moyenne ± erreur standard ; n = 11 sujets.
* significativement différent de la valeur Témoin.

La vitesse maximale de contraction a également diminué pendant toute la période d'investigation, et à Post, elle représente 39,85 ± 20,88 % de sa valeur Témoin (F = 18,59 ; $p < 0,01$). La vitesse maximale de relaxation suit la même évolution et à Post, ce paramètre est égal à 50,43 ± 17,35 % de sa valeur Témoin (F = 8,98 ; $p < 0,01$) (Figure 2).

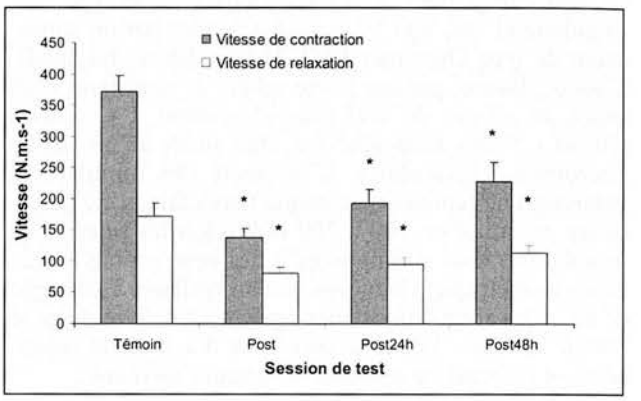

Fig. 2. – Évolution des vitesses maximales de contraction et de relaxation de la secousse lors des différentes sessions de test. Valeurs exprimées en N.m.s^{-1} ; moyenne ± erreur standard.
* significativement différent de la valeur Témoin.

L'amplitude et la durée de la réponse M ne sont pas modifiées tout au long de l'expérimentation. Les valeurs Témoin de la réponse M sont respectivement 8,13 ± 1,53 V pour l'amplitude et 8,91 ± 2,83 ms pour la durée.

DISCUSSION

La séance d'exercices

Le moment maximal excentrique développé durant le présent exercice diminue de manière significative lors des cinq séries. La diminution du moment atteint 26,53 ± 11,34 % à la dernière série ($p < 0,01$) par rapport à S1Pré. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Komi et Viitasalo (1977) et Kawakami et al. (1993), qui ont mesuré une diminution du moment de respectivement 34,6 % après 40 contractions maximales excentriques du quadriceps, et de 32,4 % après 50 contractions excentriques maximales des fléchisseurs du coude. Ces auteurs ont conclu que la diminution du moment était principalement due à l'importante contrainte mécanique subie lors de contractions excentriques maximales. En effet, il a été montré que cette tension intracellulaire élevée pouvait être responsable de dommages ultrastructuraux (Armstrong et al., 1983 ; Gibala et al., 1995). Toutefois, Hesselink et al. (1996) ont seulement observé une

faible relation entre le pourcentage de fibres endommagées et la diminution de la tension isométrique. Cependant, il est à noter que la diminution de la force lors de sollicitations excentriques n'a pas été systématiquement observée. Hortobagyi et al. (1996) et Tesch et al. (1990) n'ont mesuré aucune diminution du moment respectivement lors de 5 séries de 10 contractions maximales excentriques des fléchisseurs plantaires, et de 3 séries de 32 contractions maximales excentriques du quadriceps. Ces auteurs ont émis l'hypothèse d'une possible rotation du recrutement des unités motrices pendant les actions musculaires excentriques, qui permettrait de minimiser l'effet de la fatigue dans chaque fibre musculaire. La disparité des réponses liées à l'exercice excentrique fait apparaître que le groupe musculaire mobilisé peut aussi avoir un rôle important sur l'évolution du moment.

Alors que le moment excentrique mesuré pendant la présente étude est significativement diminué, la valeur de BB RMS correspondante ne montre aucune variation significative. Dans ces conditions, l'existence d'une défaillance du couplage excitation-contraction peut être évoquée, confirmant alors l'hypothèse de Ingalls et al. (1998). Par ailleurs, l'activité myoélectrique du muscle antagoniste est significativement augmentée à la 5ème série. Ce résultat confirme l'observation de Psek et Cafarelli (1993) pendant un exercice isométrique sous-maximal. L'activité myoélectrique des muscles antagonistes permettrait le maintien des surfaces articulaires en place. Ainsi, l'augmentation du niveau de coactivation représenterait un mécanisme protecteur de l'articulation qui peut être ici, pour une faible part, impliqué dans la diminution du moment résultant durant la séance d'exercices.

Les effets immédiats de la séance d'exercices

Immédiatement après la séance d'exercices, (Post), la mise en évidence de la diminution du moment induite par l'exercice excentrique peut être effectuée à partir des différents types de contraction. On constate en effet que le moment maximal diminue de manière significative, quel que soit le mode de contraction musculaire. Cette diminution immédiate du moment apparaît être le résultat de nombreux facteurs, à la fois centraux et périphériques.

D'une part, la séance d'exercices induit une diminution du niveau d'activation volontaire, qui pourrait, en partie, résulter de modifications d'ordre métabolique. En effet, en dépit d'un faible coût énergétique (Ryschon et al., 1997), des variations de l'équilibre métabolique peuvent apparaître lors de contractions excentriques. La diminution du pH joue un rôle dans le feedback que reçoit le système nerveux central via les afférences III et IV, et donc dans l'altération de la commande motrice centrale participant à l'état de fatigue (Bigland-Ritchie et al., 1986). Cette diminution de pH peut être accompagnée par une accumulation de Pi, de $H_2PO_4^-$, et une réduction de PCr (Béliveau et al., 1992). Ces variations d'ordre métabolique peuvent être impliquées dans une altération de la libération de Ca^{2+} du reticulum sarcoplasmique, ainsi que de la sensibilité des protéines contractiles à la concentration de Ca^{2+} (Allen., 1995).

D'autre part, la valeur de BB RMS n'est pas modifiée par rapport à sa valeur Témoin, alors que le moment maximal est significativement diminué. Ces résultats confirment l'existence d'une défaillance du couplage excitation-contraction, évoquée durant la séance d'exercices. Cette défaillance peut être confirmée par la diminution de la secousse de repos sans modification concomitante de l'amplitude de la réponse M. La propagation des potentiels d'action au niveau de la jonction neuromusculaire n'apparaît donc pas affectée par la séance excentrique. Une défaillance du processus contractile serait alors impliquée dans la diminution du moment. Cette hypothèse est confirmée par la diminution de Pt, qui peut être le résultat de micro-lésions des protéines myocontractiles et/ou des protéines myostructurales, telles que la desmine qui participe à la liaison des myofibrilles aux lignes Z (Lieber et al., 1994 ; Clarkson, 1997). La réduction des vitesses maximales de contraction et de relaxation traduit quant à elle, un ralentissement de la cinétique d'attachement et de détachement des ponts. Une réduction de l'efficacité des canaux calciques ATP-dépendants du reticulum sarcoplasmique pourrait être responsable de cet événement. En effet, la libération de Ca^{2+} par le reticulum sarcoplasmique détermine la vitesse maximale de contraction, et inversement, son repompage influence la vitesse de relaxation (Ishida et al., 1990).

L'évolution des paramètres mesurés suggère que la diminution du moment de force immédiatement après la séance d'exercices peut être imputée à des modifications d'origine centrale et périphérique, telles qu'une diminution du niveau d'activation volontaire, des modifications d'ordre métabolique ainsi qu'une possible atteinte de la structure musculaire.

Les effets retardés de la séance d'exercices

A Post24h et Post48h, le moment maximal n'a pas retrouvé sa valeur Témoin. Ce phénomène a déjà été observé par plusieurs auteurs (Kroon et Naeije, 1991 ; Gibala et al., 1995). Cependant, le moment mesuré en condition excentrique est significativement plus affecté que dans les autres type de contraction à Post24h et Post48h ($p < 0{,}01$). De plus, le moment concentrique mesuré à la vitesse rapide ($240°.\ s^{-1}$), qui est significativement inférieur au moment développé dans les autres modes d'action ($p < 0{,}01$), a retrouvé sa valeur initiale à Post48h. Ces événements semblent signifier une dépendance de la récupération avec le niveau de force développée.

Excepté à la vitesse angulaire de $240°.\ s^{-1}$, le moment maximal reste donc significativement diminué, malgré la récupération du niveau d'activation volontaire. Dans le même temps, les valeurs de RMS et l'amplitude de la réponse M sont similaires à leurs valeurs Témoin. Les mécanismes nerveux, impliqués dans la production de force ne peuvent donc rendre compte de l'évolution du moment à 24 et 48 heures après une séance excentrique. L'amplitude de la secousse, ainsi que les vitesses maximales de contraction et de relaxation sont restées infé-

rieures à leur valeur de repos, confirmant l'origine périphérique de la perte de force, déjà décrite à Post, et associée à une altération de la structure musculaire et/ou de l'équilibre métabolique. Toutefois, le pH semble retrouver sa valeur initiale en approximativement 15 minutes après des contractions isométriques sous-maximales (Miller *et al.*, 1987), et ne doit donc pas affecter la capacité de production de force 24 heures après l'exercice. Il est à noter qu'un exercice excentrique peut induire des réactions secondaires apparaissant au sein de la cellule musculaire 24 à 48 heures après la fin des contractions. Un processus inflammatoire, dans lequel le Ca^{2+} intracellulaire pourrait jouer un rôle déterminant, a en effet été rapporté (Kuipers, 1994). L'évolution du moment de force 24 et 48 heures après une séance d'exercices de type excentrique semble donc préférentiellement liée à une atteinte de l'ultrastructure musculaire, comme l'ont suggéré Gibala *et al.* (1995).

CONCLUSION

Le moment maximal excentrique diminue de manière significative durant une séance d'exercices, composée de 5 séries de 10 répétitions maximales. Cette séance induit une diminution immédiate du moment maximal, quel que soit le mode de sollicitation musculaire, qui persiste tout au long de la période de récupération de 48 heures. Immédiatement après l'exercice, la réduction du moment de force doit être imputée à la fois à une fatigue centrale et à une fatigue périphérique du système neuro-musculaire. Puis, l'atteinte de la structure musculaire semble être le principal déterminant de la valeur de moment à Post24h et Post48h. Cependant, seul le moment maximal concentrique mesuré à $240°.s^{-1}$ est récupéré à Post48h.

Il semble donc que la récupération du moment après une séance d'exercices excentriques d'intensité maximale ne dépende pas uniquement du mode d'action musculaire, mais également de la valeur de la force développée pendant la contraction.

BIBLIOGRAPHIE

Allen D. G., Lännergren J. & Westerblad H., Muscle cell function during prolonged activity : cellular mechanisms of fatigue. *Exp. Physiol.*, 1995, *80*, 497-527.

Armstrong R. B., Ogilvie R. W. & Schwane J. A., Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.*, 1983, *54*, 80-93.

Béliveau L., VanHoecke J., Garapon-Bar C., Gaillard E., Herry J. P., Atlan G. & Bouissou P., Myoelectrical and metabolic changes in muscle fatigue. *Int. J. Sports Med.*, 1992, *13*, S153-S155.

Bigland-Ritchie B., Dawson N. J., Johansson R. S. & Lippold O. C. J., Reflex origin for the slowing of motoneurone firing rates in fatigue of human voluntary contractions. *J. Physiol.*,1986, *379*, 451-459.

Clarkson P. M., Eccentric exercise and muscle damage. *Int. J. Sports Med.*, 1997, *18*, S314-317.

Ebenbichler G., Kollmitzer J., Quittan M., Uhl F., Kirtley C. & Fialka V., EMG fatigue patterns accompanying isometric fatiguing knee-extension are different in mono- and bi-articular muscles. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 1998, *109*, 156-262.

Friden J., Sjöström M. & Ekblom B., Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int. J. Sports Med.*, 1983, *4*, 170-176.

Fuglevand A. J., Zackowski K. M., Huey K. A. & Enoka R. M., Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces. *J. Physiol.*, 1993, *460*, 549-572.

Gibala M. J., MacDougall J. D., Tarnopolsky M. A., Stauber W. T. & Elorriaga A., Changes in human skeletal muscle ultrastructure and force production after acute resistance exercise. *J. Appl. Physiol.*, 1995, *78*, 702-708.

Green H., Neuromuscular aspects of fatigue. *Can. J. Sports Sci.*, 1987, *12*, 7S-19S.

Hesselink M. K. C., Kuipers H., Geurten P. & Vanstraaten H., Structural muscle damage and muscle strength after incremental number of isometric and force lengthening contractions. *J. Muscle Res. Cell Motil.*, 1996, *17*, 335-341.

Hortobágyi T., Tracy J., Hamilton G. & Lambert J., Fatigue effects on muscle excitability. *Int. J. Sports Med.*, 1996, *17*, 409-414.

Ingalls C. P., Warren G. L., Williams J. H., Ward C. W. & Armstrong R. B., E-C coupling failure in mouse EDL muscle after in vivo eccentric contractions. *J. Appl. Physiol.*, 1998, *85*, 58-67.

Ishida K., Moritani T. & Itoh K., Changes in voluntary and electrically induced contractions during strength training and detraining. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1990, *60*, 244-248.

Kawakami Y., Kanehisa H., Ikegawa S. & Futunaga T., Concentric and eccentric strength before, during and after fatigue in 13 year-old boys. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1993, *67*, 121-124.

Kellis E. & Baltzopoulos V., Isokinetic eccentric exercise. *Sports Med.*, 1995, *19*, 202-222.

Komi P. V. & Viitasalo J. T., Changes in motor unit activity and metabolism in human skeletal muscle during and after repeated eccentric and concentric contractions. *Acta Physiol. Scand.*, 1977, *100*, 246-254.

Kroon G. W. & Naeije M., Recovery of the human biceps electromyogram after heavy eccentric, concentric or isometric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1991, *63*, 444-448.

Kuipers H., Exercise-induced muscle damage. *Int. J. Sports Med.*, 1994, *15*, 132-135.

Lieber R. L., Schmitz M. C., Mishra D. K. & Friden J., Contractile and cellular remodeling in rabbit skeletal muscle after cyclic eccentric contractions. *J. Appl. Physiol.*, 1994, *77*, 1926-1934.

Merton P. A., Voluntary strength and fatigue. *J. Physiol.*, 1954, *123*, 553-564.

Miller R. G., Giannini D., Milner-Brown H. S., Layzer G. B., Koretsky A. P., Hooper D. & Weiner M.W., Effects of fatiguing exercise on high-energy phosphates, force, and EMG: evidence for three phases of recovery. *Muscle Nerve*, 1987, *10*, 810-821.

Psek J. A. & Cafarelli E., Behavior of coactive muscle during fatigue. *J. Appl. Physiol.*, 1993, *74*, 170-175.

Ryschon T. W., Fowler M. D., Wysong R. E., Anthony A. R. & Balaban R. S., Efficiency of human skeletal muscle in vivo: comparison of isometric, concentric, and eccentric muscle action. *J. Appl. Physiol.*,1997, *83*, 867-874.

Taylor N. A. S., Sanders R. H., Howick E. L. & Stanley S. N., Static and dynamic assessment of the Biodex dynamometer. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1991, *62*, 180-188.

Tesch P. A., Dudley G. A., Duvoisin M. R. & Hather B. M., Force and EMG signal patterns during repeated bouts of concentric or eccentric muscle actions. *Acta Physiol. Scand.*, 1990, *138*, 263-271.