

# L'entraînement de la force spécifique en sport : fondements physiologiques et applications pratiques

Jacques Duchateau

---

## Citer ce document / Cite this document :

Duchateau Jacques. L'entraînement de la force spécifique en sport : fondements physiologiques et applications pratiques. In: Les Cahiers de l'INSEP, n°3, 1992. L'entraînement de la force spécifique en sport : fondements physiologiques et applications pratiques. pp. 3-48;

doi : <https://doi.org/10.3406/insep.1992.885>;

[https://www.persee.fr/doc/insep\\_1241-0691\\_1992\\_num\\_3\\_1\\_885](https://www.persee.fr/doc/insep_1241-0691_1992_num_3_1_885);

---

Fichier pdf généré le 14/03/2024

# **L'entraînement de la force spécifique en sport :**

**fondements physiologiques  
et applications pratiques**

**Entretiens de l'INSEP  
22 mai 1992**

**AUTEUR :  
Jacques DUCHATEAU**

# SOMMAIRE

<b>PRÉFACE À L'ÉDITION NUMÉRIQUE DES « CAHIERS DE L'INSEP »</b> .....	<b>5</b>
<b>PRÉFACE</b> .....	<b>6</b>
<b>CONFÉRENCE</b> .....	<b>7</b>
<b>MÉCANISME DU RECRUTEMENT DES UNITÉS MOTRICES</b> .....	<b>8</b>
La gradation de la force .....	8
Les modes de recrutement .....	9
<b>SPÉCIFICITÉ DES ADAPTATIONS MUSCULAIRES</b> .....	<b>14</b>
Aspects théoriques .....	14
Aspects pratiques .....	16
Électrostimulation et spécificité des adaptations .....	19
<b>LES MÉCANISMES DE L'ADAPTATION DU MUSCLE À L'ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUE</b> .....	<b>22</b>
Le mécanisme d'hypertrophie .....	22
Les mécanismes nerveux .....	25
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>29</b>
<b>QUESTIONS-RÉPONSES</b> .....	<b>31</b>
<b>DÉBAT</b> .....	<b>38</b>
Chantalle Thépaut-Mathieu, Jacques Duchateau, Alain Lachèze, Serge Le Bozec, Régis Mollard, Claude Monot, Georges Poumarat, Michel Pradet, Jacques Van Hoecke, Christian Miller et Jacques Quièvre	
<b>LISTE DES INTERVENANTS</b> .....	<b>48</b>
<b>LISTE DES CAHIERS DÉJÀ PARUS</b> .....	<b>49</b>

# PRÉFACE À L'ÉDITION NUMÉRIQUE DES « CAHIERS DE L'INSEP »

L'édition numérique constitue une évolution importante et une innovation majeure dans l'histoire déjà ancienne des « Cahiers de l'INSEP ». Ainsi l'établissement sera-t-il en capacité de rendre à nouveau disponibles tous les cahiers, parfois épuisés, qui ont illustré et nourri, depuis près de vingt ans, la réflexion sur tous les aspects du sport et plus particulièrement du sport de haut niveau.

En « feuilletant » ce fichier électronique, vous découvrirez cette passionnante aventure éditoriale ; elle présente de nombreux avantages dès lors que la réalisation est menée avec le souci et l'objectif constants du confort du lecteur. Le service MAPI de l'INSEP a mis tout en œuvre pour que la navigation au sein de ce document soit facilitée grâce aux liens posés dans le sommaire (permettant d'accéder directement aux articles) et sur les appels de notes de bas de page. L'INSEP a également utilisé les facilités technologiques de ce nouveau support en agrémentant les articles de liens hypertextes qui pointent vers des compléments d'information.

Mais, de fait, ce passionnant projet a également été l'occasion d'un toilettage des textes et des images visant un confort de lecture accru, car il s'agit bien – au-delà de la possible mission de conservation – de « donner une seconde vie », largement méritée, à ces premiers numéros des « Cahiers de l'INSEP ». Le lecteur se replongera, avec profit, dans ces cahiers numériques, soit pour retracer l'histoire de la recherche (médicale, scientifique, sociale...), soit – et c'est le cas le plus fréquent – pour y puiser une matière encore terriblement actuelle qui nourrira ses réflexions.

Je vous souhaite une très bonne lecture.

Thierry Maudet

Directeur général de l'Institut national du sport,  
de l'expertise et de la performance (INSEP)

## PRÉFACE

Le professeur Jacques Duchateau est trois fois le bienvenu à l'INSEP. Nous saluons en effet en lui à la fois le scientifique, l'athlète et l'entraîneur.

En premier lieu, nous accueillons le scientifique, professeur à l'université libre de Bruxelles. À l'heure de l'Europe, venir d'outre-Quévrain n'est pas un problème ; l'athlétisme belge ne montre-t-il pas l'exemple en organisant régulièrement ses championnats nationaux en France, à Liévin ?

Jacques Duchateau anime, avec le professeur Karl Hainaut, le laboratoire de biologie générale et l'unité de recherche en neurophysiologie. Ses travaux sur l'adaptation neurophysiologique du muscle et de ses fibres à l'exercice sont internationalement connus. Il s'est plus particulièrement penché sur l'étude de la contraction musculaire et étudie le recrutement et la sensibilité des unités motrices à l'exercice et à l'entraînement. Ses récentes publications traitent des effets de l'immobilisation du muscle sur la commande motrice et des effets de la fatigue musculaire occasionnés en condition de contraction volontaire et par électrostimulation sur l'activité réflexe à l'étirement. Ainsi ses approches expérimentales permettent-elles d'éclairer les interrogations de l'entraîneur désireux d'améliorer la force de ses athlètes, de retarder les processus de fatigue, de mettre au point un échauffement, d'utiliser les techniques de stretching. De plus, les méthodes d'entraînement par électrostimulation connaissant un certain succès dans les milieux du sport de haut niveau et leurs utilisateurs peuvent bénéficier des conclusions de ses travaux consacrés aux effets de ce mode de contraction musculaire sur les caractéristiques des unités motrices.

Jacques Duchateau a également étudié la biomécanique de certains gestes athlétiques, en particulier le saut en longueur, comparant des impulsions effectuées à partir de hauteurs différentes. Ses résultats apportent une contribution aux processus d'amélioration de la phase aérienne de ce saut.

En deuxième lieu, nous saluons l'athlète qui fut recordman junior de Belgique au lancer de javelot, champion de Belgique junior au décathlon et qui obtint une trentaine de sélections dans ces deux disciplines au sein de l'équipe nationale belge, entre 1971 et 1980.

Enfin, nous recevons aussi l'entraîneur fédéral de javelot, le directeur technique adjoint responsable des lancers à la Ligue francophone d'athlétisme pendant plus de dix ans et, aujourd'hui, le directeur technique national de la Fédération universitaire d'athlétisme et l'entraîneur de plusieurs athlètes de niveau national.

Ses compétences de chercheur, son passé de sportif et ses fonctions d'entraîneur font de Jacques Duchateau un conférencier de choix et nous font apprécier ses propositions en matière d'entraînement.

Claude Garapon-Bar

## CONFÉRENCE

Mesdames, messieurs et chers collègues, c'est un très grand honneur d'être aujourd'hui parmi vous. Il y a quelques années, alors que je m'entraînais pour le décathlon, j'ai souvent fréquenté cet établissement, qui s'appelait à l'époque l'Institut national des sports. J'y ai côtoyé des entraîneurs de haut niveau et reçu leurs enseignements à l'occasion d'exposés théoriques et pratiques auxquels j'ai pu assister. Je dois vous avouer que c'est au cours de cette période que sont nés en moi ce besoin et cette envie de mieux comprendre ce qui se faisait sur le terrain. Mais, vous le savez, il ne suffit pas d'avoir des envies, encore faut-il avoir ou se donner les moyens de réaliser ses projets. Quelques années plus tard, j'ai intégré le laboratoire de biologie générale dirigé par le professeur Hainaut à l'université libre de Bruxelles, où j'ai pu développer une activité de recherche fondamentale, mais aussi une recherche plus appliquée, plus proche du terrain. C'est ce travail que j'aurai plusieurs fois l'occasion d'évoquer aujourd'hui.

Lorsqu'il s'est agi de mieux préciser le thème de cette conférence consacrée au développement de la force en sport, j'ai d'abord pensé, compte tenu de la richesse des publications techniques et scientifiques existant sur le sujet, qu'il me serait très difficile, non seulement de faire preuve d'originalité, mais surtout d'apporter des éléments nouveaux. Puis, à la réflexion, c'est le concept de « renforcement musculaire spécifique » qui a retenu toute mon attention. Jean-Pierre Egger, entraîneur suisse de haut niveau, ayant déjà abordé ce thème lors de la conférence inaugurale des « Entretiens de l'INSEP », il m'a semblé intéressant d'y apporter un autre éclairage, en étudiant avec vous l'adaptation spécifique du muscle à l'entraînement. Vous comprendrez qu'il a fallu faire un choix, mais que ce choix ne signifie en aucune manière que je sois opposé à la musculation générale, bien au contraire.

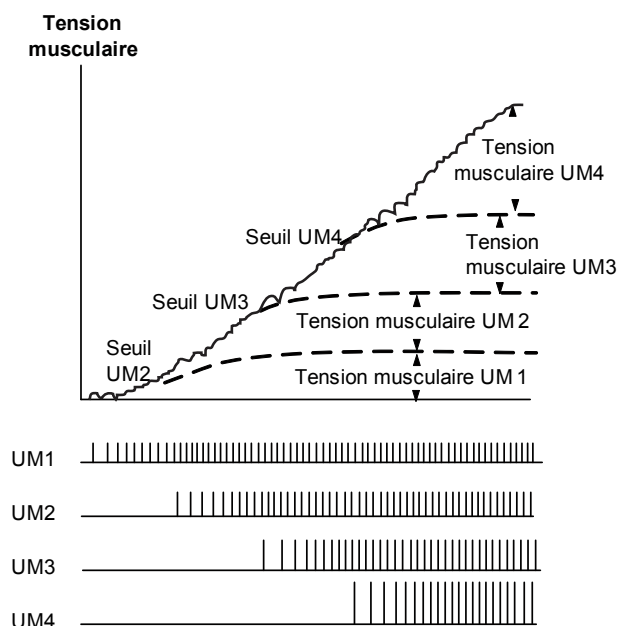
Après avoir abordé le problème de l'ordre de recrutement des unités motrices, je développerai plus particulièrement la notion de spécificité du renforcement musculaire, avant de faire une synthèse des connaissances actuelles des types et des mécanismes d'adaptation liés à l'entraînement de la force en sport.

# MÉCANISME DU RECRUTEMENT DES UNITÉS MOTRICES

## LA GRADATION DE LA FORCE

Un muscle est constitué d'un très grand nombre de fibres musculaires ; en neurophysiologie, on n'utilise pas ce terme de « fibres musculaires », car le système nerveux central (SNC) ne commande que des ensembles de fibres qui font partie d'une même « unité motrice » (UM). Le nombre de fibres musculaires par UM varie en fonction du muscle : de dix à vingt, pour le muscle oculomoteur, jusqu'à mille – et même davantage –, pour les gros muscles de la jambe. Chaque UM est innervée par un neurone dont le prolongement, appelé axone, se ramifie vers les différentes fibres. Dès que le SNC active un neurone, toutes les fibres innervées par celui-ci se contractent simultanément. Enfin, les fibres appartenant à une UM sont du même type. En effet, nous possédons deux grands types de fibres dont les propriétés biochimiques et physiologiques sont différentes et, au sein d'une même UM, il y a donc une certaine homogénéité quant au type de fibres.

Lorsque nous réalisons une contraction musculaire, la question est alors de savoir quels sont les mécanismes qui permettent de comprendre que la force développée peut augmenter progressivement. Depuis de nombreuses années, nous savons qu'ils sont de deux sortes : le recrutement d'un nombre croissant d'UM et l'augmentation de la fréquence des impulsions nerveuses. La figure 1 montre la manière dont le SNC agit pour développer une force de plus en plus importante. Une UM1 mise en jeu développe une certaine tension mécanique relativement faible, de l'ordre de quelques grammes, dont vous avez l'expression mécanique dans la partie supérieure de la figure 1.



**Figure 1** – Représentation schématique des modalités de recrutement des unités motrices (UM). Le moment de recrutement ainsi que la fréquence d'activation des quatre UM sont représentés dans la partie inférieure de la figure, la tension mécanique développée par chaque UM et leur sommation apparaissant dans la partie supérieure (modifiée d'après Winter, 1979).

Cette UM, en répétant un certain nombre de fois son activité, provoque une sommation tétanique qui lui permet d'augmenter de cinq à dix fois sa contribution à la force développée. On atteindra progressivement la force maximale pour cette UM. Il va donc falloir recruter une seconde UM2 qui, à son tour, augmentera sa fréquence d'impulsion et apportera sa contribution mécanique à la première.

Ainsi, en recrutant de plus en plus d'UM, on augmentera la force développée par le muscle concerné. Ce qu'il importe de savoir, c'est que ce mécanisme de recrutement des UM est limité, en tout cas pour les principaux muscles, à environ 80 % de la force maximale. Autrement dit, le mécanisme de recrutement est responsable de seulement 80 % de la force exprimée. Comment peut-on alors augmenter ce niveau de force et mobiliser ces derniers 20 % ? Tout simplement par l'activation répétitive, c'est-à-dire par l'augmentation de la fréquence des impulsions nerveuses, principalement des dernières UM recrutées. On trouvera encore, dans quelques publications techniques à l'usage des entraîneurs, cette idée selon laquelle il faut atteindre la force maximale dans certains exercices de musculation pour mettre en jeu la totalité des UM. Cette conception, qui associe d'une manière assez simple force maximale et recrutement maximal, est donc totalement fautive.

## LES MODES DE RECRUTEMENT

Après avoir résumé les mécanismes de la gradation de la force, demandons-nous comment sont recrutés les différents types d'UM ? Les chercheurs – et à leur suite les entraîneurs – ont maintenant pris l'habitude de distinguer des UM lentes et des UM rapides, chacun de ces deux types d'UM étant défini par des paramètres physiologiques et biochimiques spécifiques.

Les UM lentes sont caractérisées par des forces développées extrêmement faibles et par des vitesses de contraction très réduites ; leur métabolisme essentiellement aérobie leur confère une capacité de résistance à la fatigue très élevée. À l'opposé, les UM rapides ont un pouvoir de force maximale important et une moindre capacité de résistance à la fatigue. Toutefois, ce groupe est habituellement divisé en deux sous-groupes :

- Des UM très rapides et très fatigables, qui ne peuvent maintenir leur force maximale que pendant un instant très court.
- Des UM rapides peu fatigables, capables de développer une force maximale inférieure à celle développée par les précédentes, mais pouvant la maintenir beaucoup plus longtemps.

Leurs paramètres physiologiques et biochimiques sont bien entendu différents, puisque les UM très rapides ont un métabolisme essentiellement anaérobie et que les UM dites intermédiaires ont un métabolisme à la fois aérobie et anaérobie.

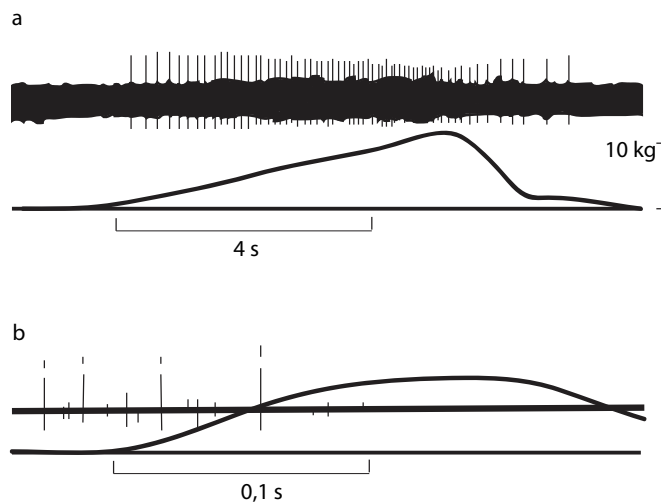
Depuis déjà longtemps, nous savons que les UM sont recrutées selon un ordre bien déterminé. Walmsley et son équipe ont réalisé en 1978 une expérimentation sur le chat, au cours de laquelle ils ont estimé le pourcentage du pool des UM recrutées lors de différentes activités dans un muscle de la patte arrière, le muscle gastrocnémien. Ces auteurs ont pu montrer que, dans la position quadrupédique, environ 25 % du pool des UM sont activés. Lorsque le chat se met à marcher, les UM sont recrutées en plus grand nombre ; pour des vitesses supérieures de marche, on obtient près de 50 % de recrutement d'UM, davantage en course et, lorsque le chat fait un saut vertical, l'ensemble du pool des UM du muscle est mis en jeu. Ces auteurs ont également pu mettre en évidence que sont recrutées, dans l'ordre, les UM les plus lentes, puis les UM rapides et résistantes à la fatigue et, enfin, lorsque les tensions exercées sont beaucoup plus importantes, les UM rapides et extrêmement fatigables. Ceci semble tout à fait logique puisque, d'expérience, nous savons qu'un déplacement lent peut être maintenu extrêmement longtemps et que plus ce déplacement s'intensifie et s'accélère, plus il sera limité dans le temps.

Il y a donc une structure assez rigide dans l'ordre de recrutement, structure qui a été clairement démontrée non seulement chez l'animal mais aussi chez l'homme.

Ce qui vient d'être décrit s'applique à des mouvements ou à des situations motrices au cours desquels l'effort est relativement lent et progressif. Mais que se passe-t-il lorsqu'on fait des mouvements



extrêmement rapides ? Il y a quelques années, on pensait que, dans ce cas précis, le SNC faisait un choix et sélectionnait superficiellement les UM lentes pour des mouvements lents et les UM rapides pour des mouvements rapides. Or tel n'est pas le cas, ainsi que le montre l'expérience réalisée par Desmedt et Godaux (1977). Ceux-ci ont en effet comparé le recrutement des UM pendant des contractions où la force est augmentée très progressivement (contractions en rampe), par rapport à des contractions où la force est développée le plus rapidement possible (contractions balistiques). Pour cela, ils ont inséré dans la masse musculaire une électrode-fil qui permet d'enregistrer l'activité d'un nombre limité d'UM (1 à 4 ou 5 UM au maximum). La partie supérieure de la figure 2 offre un exemple d'une force qui augmente très progressivement (a), tandis que dans la partie inférieure (b) nous avons une contraction qui est développée le plus rapidement possible. On peut donc remarquer que lorsque l'intensité de la contraction est augmentée progressivement, l'UM considérée est activée pour une « tension-seuil » de l'ordre de deux kilogrammes et qu'ensuite elle augmente progressivement sa fréquence de décharge. Par contre, si on réalise cette contraction le plus rapidement possible, la même UM est activée très tôt et avant même que toute force mécanique ne soit développée. Autrement dit, lors d'une contraction musculaire très rapide, de type balistique, il y a un abaissement du seuil de recrutement : celui-ci est passé de deux kilogrammes lors d'une contraction lente d'une durée totale de six secondes, à zéro kilogramme pour une contraction dont la durée totale est de l'ordre d'un dixième de seconde.



**Figure 2** – Comparaison du recrutement d'une UM au cours d'une contraction dont la force augmente progressivement (a) et d'une contraction la plus rapide possible (b). Dans les deux situations, le tracé supérieur correspond à l'enregistrement de l'activité électromyographique intramusculaire et le tracé inférieur à la force développée par le muscle (modifiée d'après Desmedt et Godaux, 1977).

Je voudrais en outre attirer votre attention sur le fait que cette UM est mise en jeu un plus grand nombre de fois lors de la contraction lente (cinquante-deux pulsations pour atteindre le sommet) que lors de la contraction rapide (quatre pulsations). La force développée dépendra, dans ce dernier type de contraction, de la possibilité d'activer un grand nombre de fois les UM recrutées. En effet, si une UM peut, pendant la même durée de contraction, apporter une ou deux fois de plus sa contribution, la force totale développée sera plus importante. C'est ce qui explique les différences observées entre des athlètes dont certains ont des possibilités d'impulsions nerveuses supérieures à d'autres et qui produiront davantage de force dans les mouvements rapides. L'idéal, pour un athlète, est de posséder un grand nombre d'UM rapides, dont nous savons que les fréquences de pulsation sont supérieures aux UM lentes.

Ce mécanisme d'abaissement du seuil de recrutement est intéressant, car il signifie que l'ordre de recrutement des UM reste identique, même lors des contractions les plus rapides : à savoir des UM les plus lentes aux UM les plus rapides. Si, en termes de physiologie fondamentale, cet aspect du mécanisme du recrutement des UM est intéressant, il l'est moins en termes de pratique de terrain car, lorsqu'on fait un effort bref, l'ensemble des UM est recruté quasiment en même temps.

Ces mêmes auteurs ont, de plus, comparé cette diminution du seuil de recrutement des UM dans quatre muscles : le muscle masséter, le premier interosseux dorsal, le jambier antérieur et le muscle soléaire, qui sont des muscles qui possèdent des proportions d'UM lentes et rapides très différentes. En effet, le masséter est le prototype du muscle rapide, le soléaire est un muscle qui possède essentiellement des UM lentes et les deux autres ont des caractéristiques intermédiaires. Si on met en relation le seuil balistique, c'est-à-dire le seuil pour lequel l'UM entre pour la première fois en activité lors de la contraction la plus rapide possible, avec le seuil en rampe de la même UM, on constate qu'il y a un abaissement du seuil de recrutement pour l'ensemble des UM, abaissement d'autant plus marqué que le muscle possède une proportion importante d'UM lentes. Autrement dit, un muscle lent interviendra davantage sur ce mécanisme d'abaissement des seuils de recrutement pour compenser sa vitesse de contraction relativement faible et recrutera donc plus précocement les UM afin d'effectuer le mouvement le plus rapide possible.

En gardant à l'esprit ces différents modes de recrutement des UM, on comprend plus facilement les deux grandes modalités d'organisation de la charge de travail que Zatsiorsky (1966) avait proposées, il y a maintenant près d'une trentaine d'années, pour créer les tensions maximales au sein d'un muscle :

- Utiliser des charges maximales ou très proches du maximum (80 à 100 %), qui provoquent le recrutement de l'ensemble des UM ; c'est la méthode des « efforts maximaux » utilisée dans de nombreuses spécialités sportives, mais plus particulièrement en haltérophilie.
- Utiliser des charges non maximales (inférieures à 80 %), que l'on peut répéter un nombre de fois plus important (8 à 15) et qui seront mobilisées de deux manières différentes :
  - À vitesse moyenne, ce qui ne permet toutefois pas de recruter au départ l'ensemble des UM ; cependant, au fur et à mesure des répétitions, un certain nombre d'UM parmi celles mises en jeu se fatigueront et des UM complémentaires seront recrutées progressivement dans le pool des UM rapides et fatigables afin d'achever les répétitions prévues. Cette méthode des « efforts répétés » permet de mobiliser l'ensemble des UM d'un muscle, et donc de les entraîner.
  - À vitesse maximale car, nous venons de le voir, il y a un abaissement du seuil de recrutement des UM lors des mouvements rapides et, bien que la charge soit parfois moyenne (40 % ou moins du maximum), l'ensemble des UM sera néanmoins mis en jeu. Cela correspond, dans la pratique, aux exercices de renforcement musculaire dynamique.

Ainsi, la conjugaison de la charge additionnelle, du nombre de répétitions et de la vitesse d'exécution génère des procédures de travail qui permettent le recrutement de l'ensemble des UM des muscles sollicités. Toutefois, les adaptations structurales et fonctionnelles de ces muscles seront très différentes en termes de dominante :

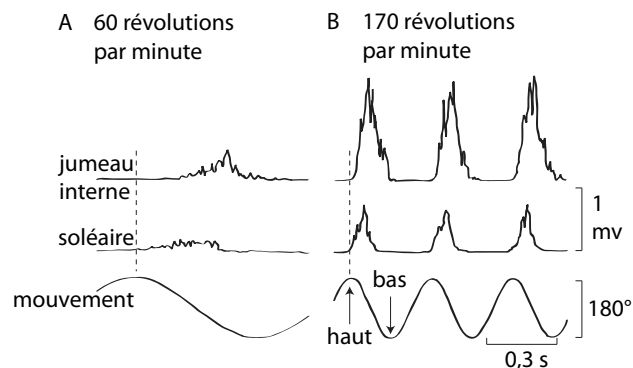
- développement de la force maximale du muscle par la méthode des « efforts maximaux »,
- hypertrophie musculaire et augmentation de la capacité de résistance à la fatigue par la méthode des « efforts répétés »,
- optimisation du recrutement des UM ou « synchronisation » par la méthode des « efforts dynamiques », dont nous reparlerons un peu plus loin.

Le mécanisme du recrutement des UM est donc maintenant mieux connu et il est remarquable de constater combien il est en accord avec les propositions théoriques et méthodologiques que Zatsiorsky avait formulées dans les années soixante.

Si l'ordre de recrutement des UM se fait selon une structure rigide, quelques exceptions sont toutefois à noter. Il y a, en effet, comme j'ai pu moi-même le constater, des modifications dans l'ordre du recrutement, mais elles sont limitées aux UM dont les seuils sont très comparables et ne concernent jamais les UM dont les seuils sont très différents. Néanmoins, dans une étude très récente, des chercheurs italiens, Nardone et coll. (1989), ont révélé que, dans certaines conditions, il peut quand même y avoir des modifications de l'ordre de recrutement des UM. Ces auteurs ont étudié ce problème en enregistrant l'activité électromyographique (EMG) des muscles soléaire et jumeaux, lors d'un mouvement de flexion plantaire. Rappelons, si besoin est, que ces deux muscles du mollet ont des pourcentages très différents de fibres lentes et rapides : le soléaire est essentiellement un muscle possédant des fibres lentes, alors que le jumeau est un muscle « mixte », c'est-à-dire qu'il présente à peu près 50 % de fibres rapides et 50 % de fibres lentes. Ces auteurs ont constaté que, lors d'une contraction concentrique, c'est surtout le soléaire qui est actif, comparé aux jumeaux. Par contre, pour la contraction excentrique, c'est tout au contraire les jumeaux qui apportent principalement leur contribution. De plus, lors de la contraction excentrique, l'EMG intramusculaire du jumeau externe montre clairement le recrutement d'UM qui ne sont pas mises en jeu lors d'une contraction concentrique de force identique. Ces UM, qui ne sont activées en contraction concentrique que pour des forces très élevées ou lors de contractions balistiques, correspondent donc à des UM à seuil de recrutement élevé. Cela signifie que des UM sont mises en jeu de manière assez étonnante pour des seuils très bas lorsque la contraction est de type excentrique. Des modifications dans le recrutement des UM pourraient donc apparaître lorsqu'on travaille à régime excentrique. Ces constatations sont certes intéressantes, mais elles nécessitent encore d'autres expérimentations pour être validées. Peut-être pourrait-on y voir les raisons pour lesquelles, dans certaines conditions, le travail excentrique donne d'excellents résultats, en tout cas dans les salles de musculation.

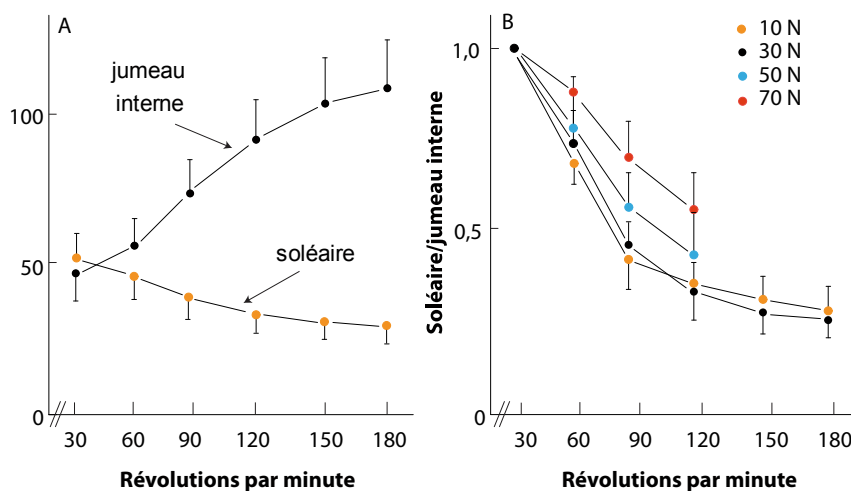
L'électrostimulation est une autre exception où l'ordre de recrutement des UM peut être modifié. On sait depuis très longtemps déjà, grâce aux expérimentations animales, que lorsqu'on stimule un nerf, on recrute les fibres nerveuses dans le sens des fibres qui innervent les plus grandes UM, donc les plus rapides avant les plus lentes. Cependant, il restait à savoir si le même phénomène était observé chez l'homme, lorsqu'on stimule à distance, c'est-à-dire à travers la peau ; en effet, en plus de la différence d'excitabilité entre les différentes fibres nerveuses, la distance de l'électrode par rapport à ces fibres peut jouer un rôle important. Dans ce but, nous avons réalisé récemment, au laboratoire, une série d'expérimentations sur plusieurs groupes musculaires différents au niveau des membres supérieurs et inférieurs. Notre méthodologie consistait à stimuler le muscle de manière isolée – un seul stimulus électrique d'intensité croissante – et à enregistrer la secousse mécanique, autrement dit : la force développée par la stimulation. Nous avons mesuré le temps de contraction de cette secousse mécanique qui, indirectement, nous renseigne sur le recrutement d'UM lentes ou rapides. Nous avons obtenu une relation de type puissance entre le temps de contraction global de la secousse (qui représente bien entendu la somme algébrique de l'ensemble des UM recrutées) et l'intensité du courant. Cette relation montre que, pour un même incrément d'intensité du courant, l'augmentation du temps de contraction est plus importante dans la gamme des stimulations faibles que dans celle des stimulations élevées. Ces constatations laissent donc supposer que l'on recrute d'abord des UM rapides, dont le temps de contraction est relativement court, et que l'on évolue ensuite vers un recrutement d'UM plus lentes, dont le temps de contraction est plus long. Ces arguments complètent ceux de la littérature sur ce sujet et suggèrent que l'ordre de recrutement par l'électrostimulation se fait dans un ordre quasiment inverse de celui de la contraction volontaire. Ceci peut avoir des conséquences intéressantes, sur lesquelles je reviendrai plus loin.

Nous venons d'évoquer l'ordre de recrutement des UM au sein d'un même muscle. Qu'en est-il au niveau des muscles synergistes, dont on sait qu'ils sont parfois différents quant à leur composition en fibres rapides et lentes ? Pour étudier le recrutement des muscles ayant des propriétés particulières lors de mouvements lents et rapides, nous avons réalisé un travail expérimental en collaboration avec Serge Le Bozec. Celui-ci consistait à analyser, en utilisant des vitesses de pédalage différentes, l'activité électromyographique du **muscle jumeau interne** et du muscle soléaire (figure 3). On a pu ainsi observer qu'à vitesse lente, le muscle le plus lent (le soléaire) est recruté avant le muscle le plus rapide (le jumeau interne – figure 3A), et qu'à vitesse plus rapide, les deux muscles sont quasiment synchronisés quant à leur recrutement (figure 3B).



**Figure 3** – Comparaison de l'activité électromyographique du jumeau interne et du soléaire lors du pédalage contre une charge de 10 N pour deux vitesses différentes : 60 et 170 révolutions par minute.

Pour essayer d'estimer la contribution respective de ces deux groupes musculaires travaillant à différentes vitesses de pédalage, nous avons intégré les EMG et nous les avons exprimés en fonction de la vitesse de pédalage (figure 4). Nous constatons que le muscle le plus lent voit sa contribution progressivement diminuer avec l'accroissement de la vitesse, tandis que le muscle le plus rapide contribue de plus en plus, au fur et à mesure de cette augmentation (figure 4A).



**Figure 4** – A) Évolution de l'électromyogramme intégré (IEMG) des muscles jumeau interne et soléaire pour différentes vitesses de pédalage contre une charge constante de 30 N. B) Comparaison, pour différentes charges (de 10 à 70 N), de la contribution relative du soléaire par rapport au jumeau interne en fonction de l'augmentation de la vitesse de pédalage (d'après Duchateau et coll., 1986).

De plus, le rapport entre contribution du soléaire et contribution du jumeau (SOL/MG) pour différentes charges diminue progressivement (figure 4B). Ceci indique clairement que le soléaire contribue de moins en moins et le jumeau de plus en plus au mouvement lorsque celui-ci devient plus rapide. En d'autres termes, cela signifie que, si l'on entraîne à des vitesses lentes des groupes musculaires synergistes tels que ceux-ci, on mettra en jeu des pourcentages faux de leur contribution respective au mouvement. Autrement dit, si l'on entraîne des muscles à une intensité ou à une vitesse qui ne correspond pas à celle de la compétition dans une discipline considérée, on obtient peu ou pas d'adaptations spécifiques.

Ainsi, au-delà des aspects topographiques et spatiaux d'une gestuelle technique, la spécificité, en termes de renforcement musculaire, recouvre les notions de vitesse d'exécution et, par conséquent, de charges additionnelles très spécifiques, dont l'archétype est représenté en général par « la compétition ».

## SPÉCIFICITÉ DES ADAPTATIONS MUSCULAIRES

Avant d'aborder cette spécificité des adaptations du muscle à l'effort, rappelons que le renforcement musculaire peut s'envisager en fonction de critères variés ; le type de contraction (isométrique, dynamique concentrique, dynamique excentrique) est sans doute le critère le plus important, surtout quand il s'agit de musculation spécifique.

### ASPECTS THÉORIQUES

Dans une publication de l'INSEP intitulée *Le Renforcement musculaire*, Marini et coll. (1984) ont fait une revue de question qui met en évidence les effets des types de contraction dans le renforcement musculaire. Ils concluent que les gains de force obtenus après entraînement sont toujours supérieurs lorsque l'on teste ce gain de la même manière que l'exercice, c'est-à-dire avec le type de contraction utilisé pour l'entraînement ; en outre – et ceci est une constante –, si l'entraînement est de type isométrique et si l'on teste la force en isométrique, elle sera supérieure à celle que l'on aura testée avec une force de contraction anisométrique, et inversement. Il y a donc une spécificité au niveau du type de contraction utilisé.

Un autre exemple nous est offert par une étude de Lindh, réalisée en 1979. Cet auteur a comparé les résultats d'un entraînement isométrique des **muscles quadriceps** du genou, en utilisant différentes modalités pour le post-test :

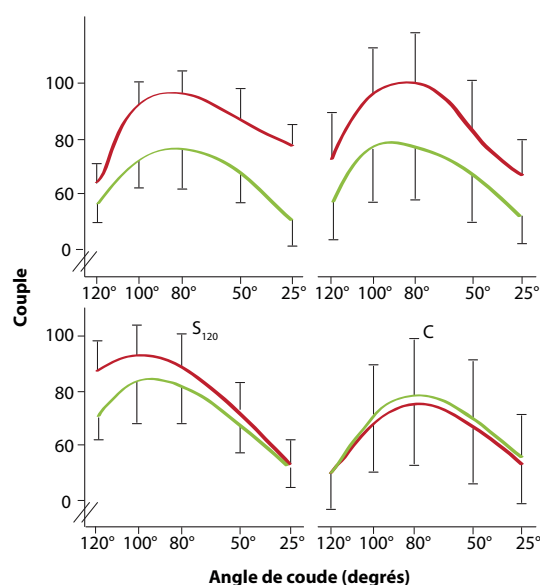
- les gains de force acquis par un entraînement de type isométrique sont moindres lorsqu'on les mesure au moyen d'une contraction isocinétique ; autrement dit, le transfert d'une force isométrique acquise est d'autant plus faible que le geste d'expression de la force est dynamique ;
- les gains de force isométriques sont spécifiques de l'angle d'entraînement : à un angle de test de 60 degrés, ils sont inférieurs à un angle de 15 degrés, qui était l'angle d'entraînement.

La spécificité des gains de force en fonction de l'angle d'entraînement a été clairement établie par Thépaut-Mathieu, Van Hoecke et Maton (1988). Ces auteurs ont étudié les effets d'un entraînement de type isométrique de cinq semaines sur la relation couple-angle des muscles fléchisseurs des bras (figure 5) ; ils ont ainsi constaté que :

- si l'on entraîne le **biceps** sous un angle très ouvert, c'est-à-dire dans une position où le muscle est relativement allongé, les plus grands gains de force sont obtenus pour cet angle d'entraînement ;
- si l'on entraîne le biceps en position raccourcie, c'est à nouveau pour l'angle d'entraînement que l'on obtient la meilleure amélioration de la force.

Autrement dit – et cette expérimentation confirme les résultats d'autres études –, il y a une spécificité de l'adaptation du muscle en fonction de l'angle d'entraînement pour la contraction isométrique.

Ainsi, il y a spécificité de l'angle d'entraînement, mais également spécificité en fonction de la charge utilisée. La figure 6 montre comment se transforme la relation entre charge et vitesse, en contraction

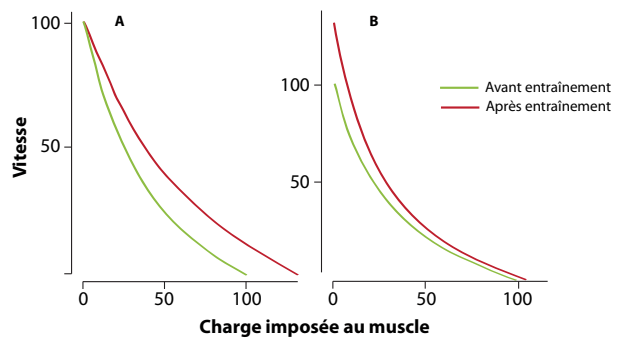


**Figure 5** – Couple de forces développé par les fléchisseurs du coude pour différentes angulations articulaires, avant (vert) et après (rouge) entraînement par contraction isométrique. L<sub>25</sub>, M<sub>80</sub> et S<sub>120</sub> correspondent respectivement à un angle d'entraînement de 25, 80 et 120 degrés. C : groupe contrôle non entraîné (modifié d'après Thépaut-Mathieu et coll., 1988).

concentrique, selon que l'on utilise, à l'entraînement, des charges maximales (ou très proches du maximum) ou des charges légères (30 à 40 % de la force maximale du sujet), que l'on mobilise avec la plus grande vitesse possible. Les résultats indiquent qu'il existe manifestement une adaptation spécifique de cette relation aux différentes charges utilisées :

- les charges élevées procurent surtout une augmentation de vitesse dans la partie de la relation qui concerne les charges importantes (A) ;
- inversement, les charges légères (B), mobilisées à vitesse élevée, influencent essentiellement la partie gauche de la relation, c'est-à-dire celle qui concerne les charges faibles.

Ceci correspond à ce que nous observons sur le terrain, à savoir qu'un haltérophile, par exemple, qui utilise des charges élevées à une vitesse la plus rapide possible, est capable de réaliser des gestes très dynamiques avec des charges importantes, pendant son entraînement, alors qu'il n'a pas une vitesse gestuelle particulièrement élevée avec des charges légères. À l'opposé, les joueurs de tennis de table ont des capacités considérables de vitesse gestuelle, mais qui ne se manifesteront pas du tout s'ils doivent mobiliser des charges additionnelles importantes.



**Figure 6** – Représentation schématisée des adaptations spécifiques de la relation entre force et vitesse après entraînement avec charges lourdes (A) et charges légères, 30-40 % du maximum, mobilisées le plus vite possible (B).

Un autre type de spécificité de l'adaptation est celui lié à la vitesse du mouvement. Kanehisa et Miyashita ont réalisé, en 1983, une expérimentation avec un appareil isocinétique sur trois groupes de sujets qui se sont entraînés chacun à des vitesses différentes de mouvement : lent, très rapide, intermédiaire. Le constat est encore de même nature, à savoir que le gain de force est spécifique de la vitesse d'entraînement utilisée :

- le groupe qui s'est entraîné à vitesse lente augmente surtout sa force pour des vitesses lentes et de moins en moins lorsque l'on teste le gain de force à des vitesses plus rapides ;
- le groupe qui s'est entraîné à vitesse élevée augmente surtout sa force pour des vitesses rapides et beaucoup moins pour des vitesses lentes ;
- le groupe intermédiaire, qui s'est entraîné avec des vitesses intermédiaires, augmente sa force quelle que soit la vitesse-test utilisée ; néanmoins, cette progression est moins importante que dans les deux situations extrêmes.

Nous mentionnerons enfin une dernière adaptation du muscle à l'entraînement, et non la moindre, celle liée au mouvement lui-même et, par extension, à la gestuelle technique. Des sujets ont en effet été entraînés avec des charges additionnelles importantes (de l'ordre de 80 % de la force maximale) dans un exercice classique de flexions des jambes, le squat. Les auteurs ont comparé les gains de force mesurés après entraînement dans deux exercices-tests : le squat et la presse horizontale. Ils ont constaté, là encore, que les gains sont supérieurs quand on teste la force au moyen de l'exercice d'entraînement à ceux obtenus quand on teste la force dans un exercice différent qui, pourtant, fait intervenir sensiblement les mêmes groupes musculaires. Certes, dans cette expérimentation, les gains de force très importants – près de 70 % après huit semaines d'entraînement – tendraient à montrer que les sujets n'étaient pas très entraînés au départ. Toutefois, cela ne remet pas en question la spécificité de l'adaptation du



muscle, d'autres études l'ont abondamment montrée. Ainsi, si l'on teste la force de flexion du biceps dans le mouvement d'entraînement (flexion-extension en supination) et dans un autre mouvement-test (flexion en pronation), les gains de force les plus importants sont à nouveau enregistrés quand l'exercice d'entraînement coïncide avec l'exercice utilisé pour le test.

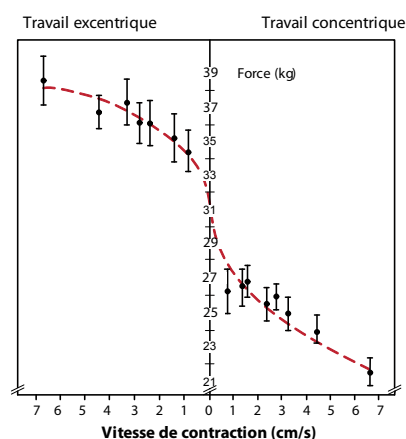
En résumé, il existe une série de spécificités d'adaptation du muscle à l'entraînement en fonction du mouvement, de la charge, de la vitesse d'exécution, du type de contraction et (en ce qui concerne l'isométrie plus particulièrement) de l'angle utilisé à l'entraînement. Aussi, dès qu'un entraîneur souhaite programmer un renforcement musculaire spécifique, il doit préalablement se livrer à une analyse extrêmement fine de sa discipline, pour que les formes de travail qu'il proposera aux athlètes soient réellement spécifiques de l'activité de compétition.

## ASPECTS PRATIQUES

Dans les revues techniques à l'usage des entraîneurs, la relation entre force et vitesse a parfois été présentée assez simplement pour être accessible à tous. Cette présentation a conduit les auteurs à associer des types d'exercices, des formes de travail et des disciplines sportives et, finalement, à faire des propositions qui avaient valeur de règle. Ainsi par exemple :

- avec 80 % du maximum ou plus, on est dans le domaine de la force pure,
- telle discipline sportive relève du registre de la force rapide ou de celui de la force explosive.

Si, en termes de gestuelle, cela est globalement vrai, ça ne l'est plus quand on s'intéresse à la réalité de l'activité et à celle du fonctionnement du muscle. En effet, dans la plupart des sports, notamment dans les disciplines comme les sauts et les lancers, le muscle ne fonctionne pas sur le seul mode de la contraction concentrique, mais dans un système où il est préalablement étiré, ce qui change fondamentalement les choses. Aujourd'hui, lorsque l'on parle de la relation entre force et vitesse en sport, on ne se contente plus d'évoquer seulement le mode concentrique (partie droite de la relation force-vitesse sur la figure 7) mais aussi le mode excentrique (partie gauche de la figure 7). Et nous constatons alors que les forces développées sur le mode excentrique sont de loin supérieures à celles que l'on peut développer sur le mode concentrique. Ainsi, pendant longtemps, les sportifs se sont le plus souvent contentés de faire de la musculation sur le mode concentrique. Il y a plus de dix ans, les sauteurs en hauteur faisaient de

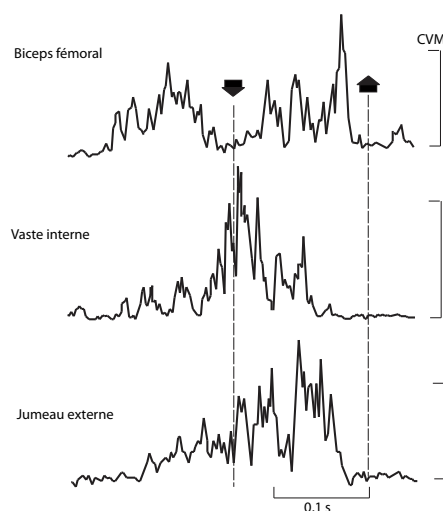


**Figure 7** – Représentation complète de la relation force-vitesse (modifiée d'après Komi, 1973).

la musculation des jambes, pendant l'hiver, avec des charges extrêmement lourdes (plus de 200 kilogrammes), en ne consacrant que peu de temps au travail technique de saut. Dès qu'ils reprenaient l'entraînement spécifique à l'approche de la période de compétition, leurs sauts étaient lents, sans réaction lors de la phase d'impulsion : ils « passaient au travers » (comme on dit en langage de terrain), alors qu'ils disposaient souvent d'une force considérable au niveau des jambes. En réalité, celle-ci n'était pas suffisante pour affronter la phase d'impulsion caractéristique du saut en hauteur, dont on sait maintenant qu'elle exige, pour les meilleurs spécialistes mondiaux, des tensions musculaires de l'ordre de 600 à 700 kilogrammes sur une jambe pendant quelques millisecondes. Dans ces conditions, le travail concentrique est notoirement insuffisant et il faut utiliser les modes de contraction excentrique et pliométrique pour développer la capacité du muscle à produire ce très haut niveau de tension.

Parmi beaucoup d'exemples, je vous proposerai celui du départ du sprinteur en starting-blocks, parce qu'il me paraît très significatif. *A priori*, on peut penser que la phase de poussée consiste principalement en un travail concentrique que l'on améliorerait spécifiquement par une musculation de type concentrique. Or, l'enregistrement des variations de longueur des muscles – vaste interne pour le quadriceps et jumeaux pour le mollet – montre qu'il n'en va pas tout à fait ainsi : le vaste interne se raccourcit du début à la fin de la poussée, alors que les jumeaux s'allongent préalablement à la contraction concentrique. Ceci s'explique aisément par la configuration des starting-blocks, qui laissent le talon sans appui au moment de la poussée, imposant ainsi une contraction excentrique préalable. Cela veut dire qu'avec ce type d'approche, on peut aller encore plus loin dans la spécificité et faire travailler différemment des muscles synergistes. On voit bien, finalement, que toute la difficulté d'un programme de musculation spécifique consiste à faire, avant le choix des procédures de travail, la meilleure analyse possible du mouvement.

Quand on parle de musculation, on évoque souvent et presque exclusivement le travail avec haltères ; or, il est possible de pratiquer un excellent renforcement musculaire spécifique à sa discipline en ne modifiant que quelques paramètres, afin de conserver une gestuelle qui soit la plus proche possible de celle de la compétition. La figure 8 représente une impulsion au saut en longueur au cours de laquelle nous avons enregistré l'activité électromyographique de trois muscles : le biceps fémoral, le vaste interne et un muscle du triceps sural, le jumeau externe. Les deux flèches représentent respectivement le moment où le pied entre en contact avec le sol et celui où il le quitte. L'espace entre les flèches correspond donc au temps d'impulsion qui est, pour cet athlète, d'environ treize centièmes de seconde. Nous constatons que l'EMG des muscles considérés présente des pics d'activité relativement importants à des moments différents de l'impulsion. Une manière simple d'avoir une idée de la force développée est de comparer l'amplitude de cette activité électromyographique à celle que l'on obtient lors d'une contraction isométrique. Nous constatons alors que, dans la phase d'impulsion, on dépasse la tension que l'on peut obtenir lors d'une contraction isométrique maximale.



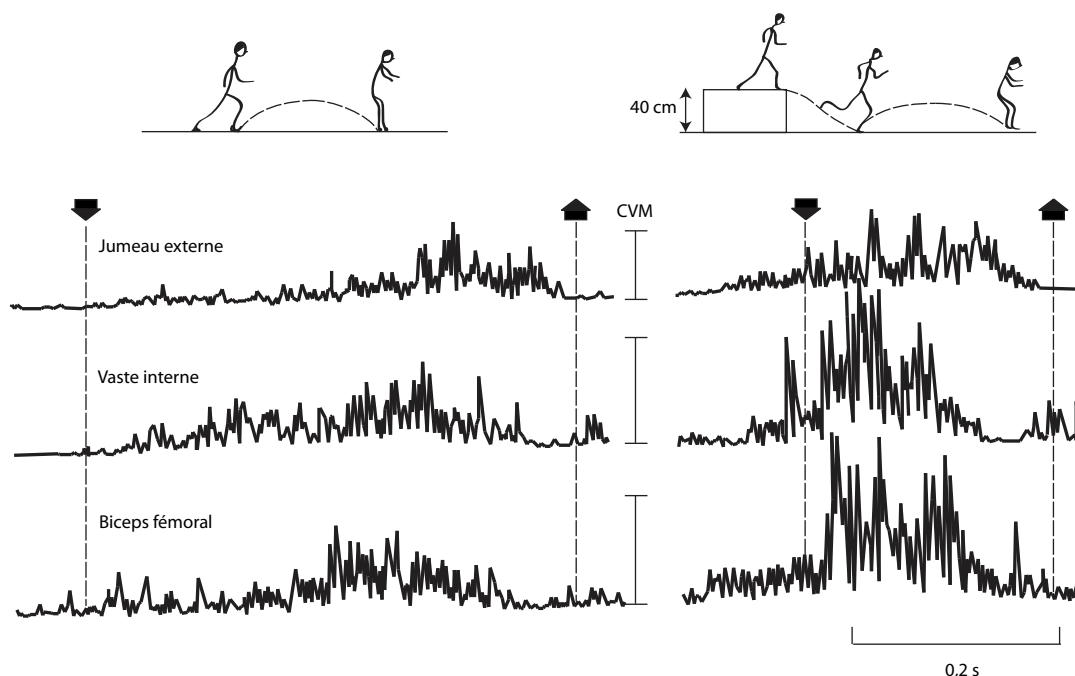
**Figure 8** – Activité électromyographique de trois muscles pendant la phase d'impulsion d'un saut en longueur avec élan. Les flèches indiquent le moment où le pied touche ( $\uparrow$ ) et quitte ( $\downarrow$ ) le sol. Pour chaque muscle, l'amplitude du tracé électromyographique est comparée à celle enregistrée lors d'une contraction isométrique volontaire maximale (CVM) [d'après Carpentier et Duchateau, 1990].



Ceci confirme qu'à certains moments, les tensions musculaires que l'on enregistre lors d'une impulsion sont de loin très supérieures à celles que l'on enregistre lors de contractions concentriques ou isométriques. Dès lors, pour choisir des exercices préparatoires qui permettent de retrouver ce type de tensions spécifiques, nous avons comparé deux situations classiquement utilisées : un saut en longueur sans élan, puis une impulsion réalisée à la suite d'un « saut en profondeur ». Dans nos conditions d'expérimentation, le sauteur chutait d'une hauteur de 40 centimètres sur sa jambe d'impulsion puis effectuait son saut en longueur. Nous avons constaté que, dans les deux situations étudiées, les activités électromyographiques sont différentes pour les trois muscles considérés (figure 9).

Dans cet exercice de pliométrie que représente le saut en profondeur, on constate que :

- la durée d'impulsion est plus proche de la situation de compétition ;
- les tensions musculaires générées sont comparables à celles rencontrées dans le geste spécifique de compétition, ce qui n'est jamais le cas dans le saut en longueur sans élan.



**Figure 9** – Activité électromyographique des muscles jumeau externe (JE), vaste interne (VI) et biceps fémoral (BF) pendant la phase d'impulsion d'un saut en longueur sans élan ou précédé d'une chute en contrebas. Pour chaque muscle, l'amplitude du tracé électromyographique est comparée à celle enregistrée lors d'une contraction isométrique volontaire maximale (CVM) (d'après Carpentier et Duchateau, 1990).

La pratique sportive en général et les exercices d'entraînement en particulier sont très riches en situations permettant de créer les tensions maximales dans le muscle, tensions indispensables pour développer sa force. Prenons maintenant deux autres exemples : la course de vitesse et le lancer de javelot.

#### • La course de vitesse

Dans le domaine du sprint, et cela depuis de nombreuses années, les entraîneurs cherchent à améliorer les qualités de vitesse des athlètes en essayant de les faire courir à des vitesses supérieures à celles qu'ils peuvent atteindre par des moyens naturels. En effet, il semble qu'il existe un stéréotype de vitesse (la « barrière de vitesse »), que l'on ne pourrait dépasser qu'à la condition de courir plus rapidement, c'est-

à-dire en « sur-vitesse ». La course en descente, favorable à cette sur-vitesse, est un des moyens qui a été le plus couramment utilisé dans le passé. Mais ce procédé modifiait trop la technique de la foulée et les entraîneurs se sont rendu compte qu'il n'était certainement pas le plus favorable. D'autres techniques ont donc été mises au point et les athlètes se font maintenant tracter par une moto, ou par un câble actionné par un moteur, ou même par un autre athlète, ce qui les oblige à courir plus vite qu'ils ne peuvent le faire naturellement. Cette méthode s'est avérée très intéressante et une équipe de chercheurs animée par Paavo Komi, de l'université de Jyväskylä (Finlande), a étudié l'activité électromyographique des principaux muscles des jambes lors de courses à vitesses supra-maximales. La comparaison de la course normale à vitesse maximale et de la course en sur-vitesse montre que cette dernière permet d'atteindre une vitesse accrue de 7 à 8 %. En nous intéressant spécialement à la phase de contact avec le sol, on constate que l'activité électromyographique des muscles vaste externe, biceps fémoral et jumeaux est plus intense à vitesse supra-maximale, et ce principalement lors de la phase excentrique. Ceci prouve que nous avons là un moyen particulièrement intéressant, non seulement pour vaincre (« casser », comme on le dit couramment) cette « barrière de vitesse », mais aussi pour réaliser un renforcement musculaire spécifique de haute qualité. C'est le geste même de compétition qui permet de créer des tensions intra-musculaires supérieures à celles générées habituellement par le geste technique. Nous nous trouvons donc devant une situation de renforcement musculaire spécifique extrêmement pointue.

#### • Le lancer de javelot

J'ai réalisé une expérimentation sur l'exercice classique du « pull-over ». Le mouvement a d'abord été effectué à partir d'une position fixe, de manière à avoir une contraction essentiellement concentrique, puis selon un cycle concentrique-excentrique dans lequel l'athlète laisse aller sa charge vers le bas et en arrière, avant de réagir le plus rapidement possible en sens inverse. L'activité électromyographique de deux muscles participant à ce mouvement – à savoir le grand pectoral et le deltoïde antérieur – a été enregistrée. Nous avons pu remarquer que c'est au cours de la seconde situation que l'activité électromyographique des deux groupes musculaires était la plus importante. Autrement dit, même dans des exercices de musculation très classiques, il est possible de rechercher une certaine spécificité en utilisant le cycle « étirement-détente » dans des formes d'exercices qui se rapprochent ou reproduisent globalement, voire partiellement, la gestuelle spécifique, comme ici le « pull-over » pour le lancer de javelot.

La notion de spécificité de l'entraînement de la force implique que l'on prenne en compte l'ensemble des paramètres qui caractérisent le geste lui-même : le type de contraction, la vitesse d'exécution, le niveau de la charge, ainsi que le mouvement dans ses composantes spatiales. Et nous savons que, sans une analyse profonde du geste technique de compétition, l'effet obtenu peut être surprenant. Ce geste, parfois légèrement modifié, reste le meilleur outil pour l'entraînement de la force spécifique puisqu'il permet, dans certaines conditions bien particulières, de créer des tensions intramusculaires maximales.

### ÉLECTROSTIMULATION ET SPÉCIFICITÉ DES ADAPTATIONS

Depuis une quinzaine d'années, le procédé de musculation par électromyostimulation s'est généralisé à la quasi-totalité des pratiques sportives, au point d'apparaître comme une méthode parée de toutes les qualités. Au-delà du phénomène de mode, que nous avons rencontré pour bien d'autres procédés d'entraînement, nous allons nous interroger sur cette technique de développement de la force pour savoir si elle est réellement efficace, quelle est, ou non, sa supériorité par rapport à la contraction volontaire, et enfin, si elle est intéressante dans le cadre de la spécificité de l'entraînement musculaire.

- Concernant la première interrogation, il est clair que l'électromyostimulation est un procédé efficace de renforcement musculaire. L'analyse de la littérature sur ce sujet (tableau 1) montre que, quels que soient

le groupe musculaire et le protocole utilisés (les protocoles sont assez différents, ce qui rend parfois délicate la comparaison entre les différentes études), l'électromyostimulation permet d'augmenter la force développée par le muscle. Seuls Davies et coll. (1985) semblent d'un avis contraire. En rapportant ces gains de force au nombre de séances, on constate qu'ils sont relativement variés d'une étude à l'autre. Toutefois, ils correspondent aux variations que l'on rencontre en utilisant la contraction volontaire.

Références	Muscles entraînés	Fréquence de stimulation (Hz)	Modalités Nombre de séries × (stim-repos)	Nombre de séances	Gains	
					Force (%)	Par séance (%)
Protocole de Kots et protocoles similaires						
Kots (1971)	BB	2 500 mod 50	10 × (10-50 s)	19	38	2,0
Lysen (1981)	QF	2 500 mod 50	10 × (10-50 s)	14	11	0,8
Laughmann et coll. (1983)	QF	2 500 mod 50	10 × (10-50 s)	25	22	0,9
Currier et Mann (1983)	QF	2 500 mod 50	10 × (10-50 s)	15	16	1,1
Selkowitz et Vodovnik (1985)	QF	2 500 mod 50	10 × (10-1000 s)	12	44	3,6
Stefanovska et coll.	QF	2 500 mod 25	10 × (10-50 s)	21	13	0,6
Miller et Thépaut-Mathieu (1990)	BB	2 500 mod 88	10 × (10-30 s)	15	30	2,0
Autres protocoles						
Halbach et Strauss (1980)	QF	50	10 × (10-50 s)	15	22	1,5
Eriksson et coll. (1981)	QF	200	12 × (15-15 s)	20-25	18	0,8
Romero et coll. (1982)	QF	2 000	112 × (4-4 s)	10	21	2,1
					31	3,1
Davies et coll. (1985)	ID	60	80 × (10-20 s)	40	-11	-0,3
Stefanovska et Vodovnik (1985)	QF	25	10 × (10-50 s)	21	25	1,2
Ferrance et coll. (1987)	QF	50	30 × (12-48 s)	30	9	0,3
Cabric et Appel (1987)	TS	50	15 à 25 × (5-20 s)	21	50	2,4
	TS	50		21	59	2,8
Cannon et Cafarelli (1987)	AP	50	15 × (3 à 4-10 s)	15	15	1,0
Duchateau et Hainaut (1988)	AP	100	10 × 20 × (1-1 s)	30	13	0,4

QF : quadriceps fémoral ; TS : triceps sural ; BB : biceps brachial ; ID : premier interosseux ; AP : adducteur du pouce.

**Tableau 1** – Gains de force après entraînement par électrostimulation, selon différents protocoles et différents auteurs (d'après Hainaut et Duchateau, 1992).

- Quant à savoir si l'électromyostimulation est plus ou moins efficace que la contraction volontaire, la littérature spécialisée offre beaucoup moins d'études ; en effet, pour que des comparaisons puissent être faites, il faut que les modalités d'entraînement soient les plus identiques possibles. Dans les études réalisées à ce jour (tableau 2), l'électromyostimulation n'a jamais un rendement supérieur aux contractions volontaires et les gains qu'elle provoque sont similaires, ou en tout cas inférieurs. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en électromyostimulation, on n'atteint pas souvent les mêmes niveaux de tension que lors de contractions volontaires. Mais sans doute n'est-ce pas la seule raison. Ainsi, si l'on se réfère aux études menées sur le sujet, l'électromyostimulation n'est donc pas une méthode miracle, contrairement à ce que certains ont tenté de faire croire ces dernières années. C'est une méthode efficace, parmi d'autres, pour développer la force du muscle. Tel est mon point de vue. Quand je me suis intéressé à l'étude de l'électromyostimulation, il s'agissait moins de savoir s'il y avait augmentation de force que de savoir si, grâce à cette méthode, nous pouvions augmenter la vitesse de contraction du muscle, facteur autrement plus difficile à améliorer que la force. Sachant que le SNC commande les UM à une fréquence qui peut atteindre, dans des mouvements rapides, soixante à cent stimulations par seconde, nous pouvons nous poser la question suivante : l'utilisation des fréquences supérieures à celles naturellement générées par le SNC peut-elle induire une augmentation de la vitesse de contraction ?

Des expériences menées chez l'animal ont montré que l'on peut, à long terme, modifier les vitesses de contraction d'un muscle, soit en le stimulant faiblement pour ralentir la vitesse de contraction, soit en utilisant une fréquence de stimulation élevée pour l'augmenter. Bien entendu, l'expérimentation animale se fait sur un muscle bien souvent dénervé, de sorte que la seule stimulation qu'il puisse recevoir est la stimulation électrique. Chez l'homme, il est évidemment impossible de dénervé un muscle et la stimulation électrique reçue est ajoutée à la commande motrice que le muscle reçoit régulièrement au cours de la journée. Les résultats expérimentaux montrent que la vitesse de contraction du muscle n'est pas significativement modifiée par l'électromyostimulation, alors qu'elle est augmentée après un entraînement en contraction volontaire. L'électromyostimulation n'est donc pas une méthode – en tout cas dans les conditions de l'expérimentation – qui permet de mettre en évidence son efficacité « remarquable » quant à l'augmentation de la vitesse d'une contraction musculaire.

Références	Muscles entraînés	Gains de force		Comparaisons ES/CV
		ES	CV	
Eriksson et coll. (1981)	QF	14	16	ES = CV
Laughman et coll. (1983)	QF	22	18	ES = CV
McMiken et coll. (1983)	QF	22	25	ES = CV
Miller et Thépaut-Mathieu (1990)	BB	30	28	ES = CV
Cannon et Cafarelli (1987)	AP	15	15	ES = CV
Currier et Mann (1983)	QF	16	30	ES = CV
Kubia et coll. (1977)	QF	33	43	CV > ES
Halbach et Strauss (1980)	QF	22	42	CV > ES
Mohr et coll. (1985)	QF	1	15	CV > ES
Davies et coll. (1985)	ID	-1	33	CV > ES
Duchateau et Hainaut (1988)	AP	13	21	CV > ES

QF : quadriceps fémoral ; BB : biceps brachial ; ID : premier interosseux ; AP : adducteur du pouce.

**Tableau 2** – Comparaison des gains de force après un entraînement par électrostimulation (ES) et par contraction volontaire (CV) [d'après Hainaut et Duchateau, 1992].

- Enfin, que faut-il penser de cette méthode dans le cadre de l'adaptation spécifique du muscle ? L'électromyostimulation peut certainement induire des adaptations spécifiques pour un certain nombre d'activités, et notamment pour celles qui demandent des contractions statiques. Mais là encore, nous avons vu plus haut que l'ordre de recrutement est quasiment inverse en électromyostimulation par rapport à la contraction volontaire. Par ailleurs, quand on se réfère à des mouvements dynamiques en général et à des gestes sportifs en particulier, l'électromyostimulation n'est certainement pas un moyen d'entraînement spécifique et ceci pour deux raisons :

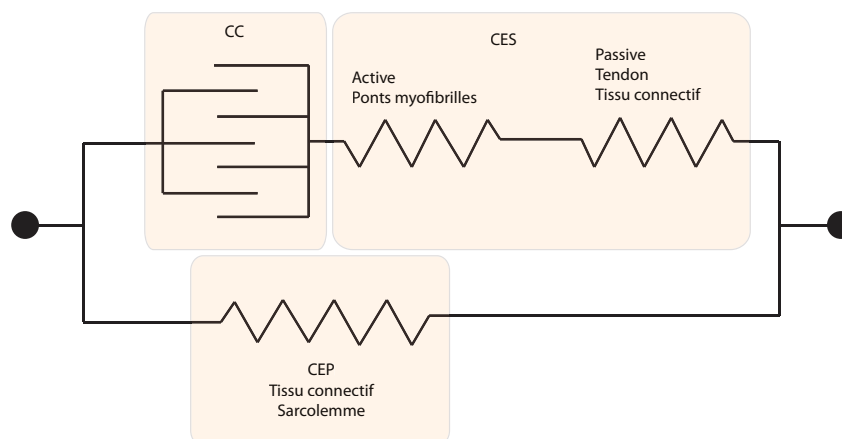
- Le type de contraction ne sera jamais de même nature que celui du geste spécifique.
- On obtiendra au mieux une force égale à la contraction maximale isométrique ; dès lors, le niveau de force enregistré sera toujours inférieur à celui que l'on obtient dans sa discipline.

Bien entendu, cela ne signifie nullement que la technique de renforcement musculaire par électrostimulation soit inutile, voire à proscrire ; elle peut s'avérer très bénéfique dans beaucoup de situations et notamment pour le renforcement musculaire général, au cours d'une séquence de réadaptation après une blessure, par exemple, ou bien encore quand l'athlète est dans l'impossibilité d'utiliser des charges élevées en raison de problèmes vertébraux. Mais, dans tous les cas, le travail ne sera pas suffisamment spécifique pour obtenir l'adaptation musculaire souhaitée.

## LES MÉCANISMES DE L'ADAPTATION DU MUSCLE À L'ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUE

On peut démontrer expérimentalement que l'entraînement musculaire sollicite deux mécanismes d'adaptation que l'on a pris l'habitude de dissocier : un mécanisme structurel et un mécanisme nerveux. Nous avons testé les gains de force après un programme d'entraînement de trois mois, suivant deux modalités différentes : la stimulation électrique et la contraction volontaire maximale. Nous pouvons constater que les gains de force, quand ils sont testés en contraction volontaire, sont supérieurs à ceux que l'on enregistre lorsque nous les mesurons par stimulation électrique. Les gains obtenus par stimulation électrique reflètent l'évolution du potentiel musculaire, c'est-à-dire ce qui a réellement changé au niveau des propriétés contractiles du muscle ; les gains obtenus par contraction volontaire reflètent non seulement les modifications des propriétés contractiles, mais aussi celles d'une autre nature que l'on a pris l'habitude, pour le moment, de regrouper sous le concept « d'adaptation nerveuse ». Nous allons essayer de voir, à présent, à quels mécanismes elles obéissent.

Où peuvent se situer ces différentes adaptations musculaires ? Pour répondre à cette question, reprenons le modèle du muscle de Hill, modifié par de nombreux auteurs et proposé ici par Shorten (1987) [figure 10]. On peut décomposer le muscle en deux composantes : l'une contractile (CC), l'autre élastique, elle-même séparée en une composante élastique parallèle (CEP) et une composante élastique série (CES). Pour ce qui nous concerne ici, la CEP n'a pas beaucoup d'effet, alors que la CES est très intéressante. Et l'on sait maintenant que celle-ci se situe non seulement au niveau des tendons (fraction passive), mais également au niveau des « ponts » formés entre les filaments contractiles d'actine et de myosine (fraction active). Les adaptations se feront tant au niveau de la composante contractile que de la composante élastique série et c'est ce que nous allons examiner maintenant.



**Figure 10** – Modélisation des composantes contractiles et élastiques du muscle squelettique ; description et explication dans le texte (modifiée d'après Shorten, 1987).

### LE MÉCANISME D'HYPERTROPHIE

On sait déjà depuis de nombreuses années que l'augmentation de la force est due à une augmentation des protéines contractiles au sein des fibres musculaires : plus le nombre de filaments d'actine et de myosine est grand, plus le nombre de ponts formés est important. Cette augmentation des protéines contractiles se traduit par une augmentation de la section transversale du muscle. Quand on met en relation la force développée et la surface de section du muscle, on obtient alors une excellente relation linéaire.

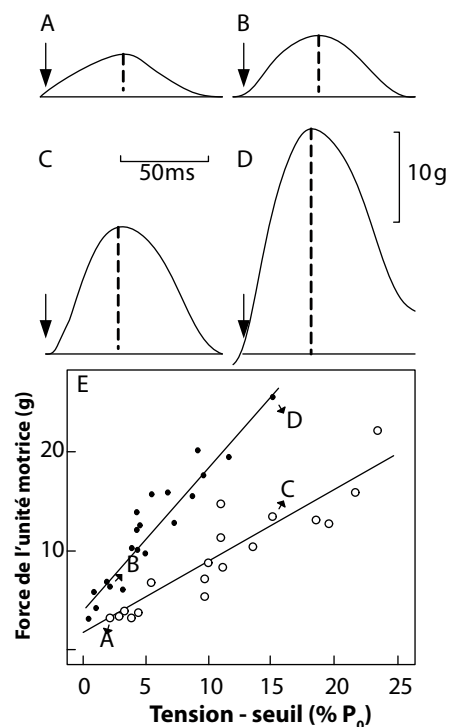
Mais cette augmentation de force est-elle due au seul phénomène d'hypertrophie ou est-elle associée à un autre phénomène appelé hyperplasie et qui serait une augmentation du nombre des fibres musculaires ? Une équipe de chercheurs canadiens (Sale et coll., 1987) a comparé la section transversale

du biceps de trois populations différentes : des « body-builders » d'un très haut niveau, des hommes sédentaires et des femmes sédentaires. En ce qui concerne la surface de section du muscle, il y a bien entendu une énorme différence entre les adeptes du body-building et les sédentaires, mais également entre les hommes et les femmes. Ces différences marquées entre les trois groupes persistent lorsque l'on compare par biopsie le diamètre de leurs fibres musculaires. Par contre, l'estimation du nombre de fibres, calculé à partir du rapport entre la surface de section du muscle et la surface moyenne des fibres, bien que nettement plus faible pour les sujets féminins, n'est pas significativement différente entre les sédentaires masculins et les adeptes du body-building. Ceci suggère que c'est un phénomène d'**hypertrophie**, et non d'**hyperplasie**, qui est à l'origine de l'augmentation de la force. D'autres études dans le monde sont arrivées à cette même conclusion, et bien qu'un ou deux groupes de chercheurs soutiennent l'hypothèse de l'hyperplasie, on peut raisonnablement supposer que l'hypertrophie musculaire est le mécanisme principal de l'augmentation de la force.

Un argument supplémentaire nous est fourni par une expérimentation réalisée par ces mêmes chercheurs canadiens (Sale, 1988), qui ont étudié les effets d'un entraînement sur une durée de six mois : cette précision est importante, car – est-il besoin de le rappeler ? – pour obtenir des modifications structurales du muscle, il faut que la période d'entraînement soit relativement longue. Ils ont pu mettre en évidence que l'utilisation de charges élevées, supérieures à 80 % de la force maximale, permet d'augmenter, dans les mêmes proportions, les diamètres des fibres rapides et lentes.

Par ailleurs, nous avons également constaté une adaptation musculaire dans une étude relative aux effets de l'entraînement sur les propriétés mécaniques des UM. Par une méthode de moyennage, il est possible d'enregistrer chez l'homme la force développée par une seule UM, en extrayant sa contribution de l'ensemble des UM participant à la contraction. Bien que cette méthode soit limitée à de petits muscles, lesquels développent de faibles forces, elle permet néanmoins des conclusions intéressantes. La figure 11, qui compare les réponses mécaniques d'UM à seuil de recrutement similaire, avant et après trois mois d'entraînement par contractions isométriques, montre un gain de force pour l'ensemble des UM. De plus, il est intéressant de noter que le taux d'accroissement de la force est le même, aussi bien pour les plus petites que pour les plus grandes UM (figure 11E). Ceci suggère que l'entraînement isométrique permet d'augmenter la force de l'ensemble des UM dans des proportions identiques. Par contre, si l'on compare cet entraînement isométrique à un entraînement de même durée, mais de type dynamique (mobilisation, le plus vite possible, d'une charge additionnelle représentant 30 à 40 % de la force maximale du muscle), nous pouvons observer (figure 12) :

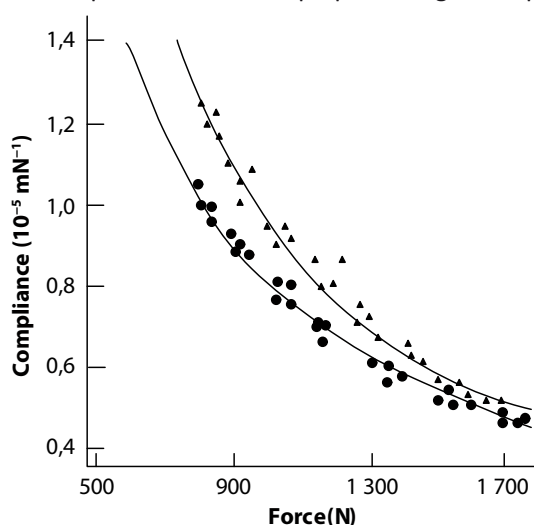
- qu'il y a augmentation de la force pour l'ensemble des UM,
- que cette augmentation est beaucoup plus faible que pour la contraction isométrique,



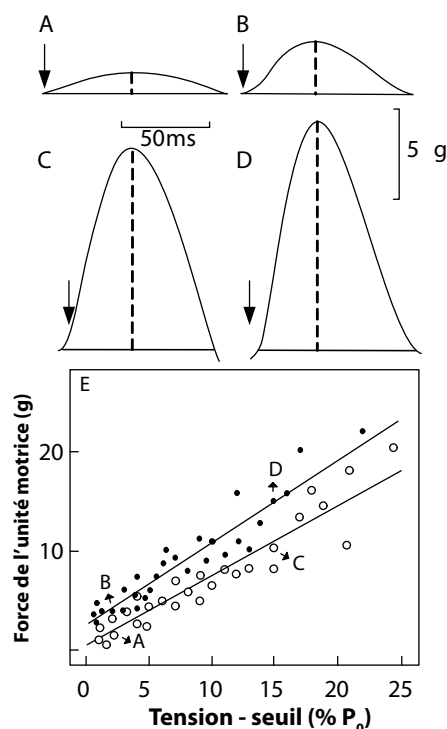
**Figure 11** – Effets de l'entraînement par contractions isométriques maximales sur les propriétés mécaniques des unités motrices (UM). Le tracé de la partie supérieure de la figure correspond à 4 UM avant (A et C) et après (B et D) entraînement. Les UM A et B sont activées pour une tension-seuil identique, mais relativement faible, tandis que les UM C et D sont recrutées pour une tension-seuil plus élevée. E : relation entre la force des UM et leur tension-seuil de recrutement avant (○) et après (●) entraînement chez un sujet. P<sub>0</sub> : force tétanique maximale (d'après Duchateau et Hainaut, 1981).

- que le taux d'accroissement de la force est plus important pour les petites UM que pour les plus grandes,
- que l'ordre de recrutement des UM n'est pas modifié.

Après avoir envisagé les mécanismes qui permettent, au niveau de la composante contractile du muscle, de rendre compte de l'augmentation de force, intéressons-nous à présent à la composante élastique. Depuis quelques années, les chercheurs, et principalement des chercheurs français, ont étudié l'adaptation de la composante élastique série, dont on sait qu'elle n'a pas un effet direct sur la force maximale développée par le muscle, mais sur la transmission, autrement dit sur la vitesse à laquelle cette force s'installe. Pousson, Van Hoecke et Goubel (1990) ont réalisé, au laboratoire de biomécanique et de physiologie de l'INSEP, une série d'expérimentations en rapport avec les effets de la contraction excentrique sur la composante élastique série du triceps sural. On peut en exprimer les caractéristiques par la relation entre compliance et force, la compliance pouvant être définie comme l'inverse de la raideur (figure 13). Après entraînement, ils ont constaté un déplacement de cette relation vers des valeurs inférieures, c'est-à-dire que la composante élastique série est devenue moins compliant, notamment pour les forces faibles comparées aux forces plus importantes. Autrement dit, après un entraînement de type excentrique, la composante élastique série s'adapte dans le sens d'une augmentation de raideur, permettant ainsi à la force maximale de s'installer plus rapidement, notamment dans des gestes où le cycle « étirement-détente » joue un rôle important, ce qui est le cas de la plupart des gestes sportifs.



**Figure 13** – Relation entre la compliance (C) et la tension musculaire (F) avant (Δ) et après (●) un entraînement excentrique (modifiée d'après Pousson et coll., 1990).



**Figure 12** – Effets de l'entraînement par contractions dynamiques (mobilisation la plus rapide possible d'une charge représentant 30 à 40 % de la force maximum) sur les propriétés mécaniques des unités motrices (UM). Le tracé de la partie supérieure de la figure correspond à 4 UM, avant (A et C) et après (B et D) entraînement. Les UM A et B sont activées pour une tension-seuil identique, mais relativement faible, tandis que les UM C et D sont recrutées pour une tension-seuil plus élevée. E : relation entre la force des UM et leur tension-seuil de recrutement avant (○) et après (●) entraînement chez un sujet.  $P_0$  : force tétanique maximale (d'après Duchateau et Hainaut, 1981).



Ce type d'expérimentation a été réalisé sur un autre groupe musculaire, le biceps, par Poulain et Pertuzon (1988), et aboutissait aux mêmes conclusions. Elle portait également sur les entraînements de type isométrique et concentrique pratiqués par deux groupes différents. Pour l'entraînement isométrique, on observait également une augmentation de raideur. En revanche, on constatait une diminution de celle-ci à la suite d'un entraînement par contraction concentrique uniquement.

Poursuivant dans cette voie, Pousson (1989) a réalisé à l'INSEP une autre série d'expérimentations sur l'entraînement pliométrique, cette fois avec des joueurs de haut niveau de volley-ball et de basket-ball. Les résultats confirment l'évolution vers une augmentation de la raideur après entraînement.

Ainsi, les entraînements de types isométrique, excentrique et pliométrique permettent d'accroître la raideur de la composante élastique série, alors que l'entraînement de type concentrique la diminue. Nous nous trouvons donc, au niveau de la composante élastique du muscle, face à un processus d'adaptation spécifique, puisque les modifications générées par la musculation de type concentrique sont différentes et opposées à la musculation de type excentrique et isométrique.

## **LES MÉCANISMES NERVEUX**

Le muscle est aussi le siège d'adaptations au niveau nerveux. En effet, de nombreuses études ont montré qu'il pouvait y avoir une augmentation de la force sans hypertrophie musculaire concomitante. C'est le cas, notamment, des entraînements qui ne durent que quelques semaines et pour lesquels on observe ce type d'adaptations.

Lorsque débute une période d'entraînement, on s'aperçoit souvent que les athlètes ne sont pas capables d'activer l'ensemble des UM et, en tout cas, de les activer à une fréquence optimale, de manière à obtenir une tension maximale. Cette observation vaut particulièrement pour les sédentaires ou pour les personnes qui n'ont pas l'habitude de faire des contractions intenses. La méthode actuellement utilisée pour mettre en évidence ce « déficit » d'activation consiste à demander aux sujets de faire une contraction isométrique maximale et à déclencher, à un moment précis, une stimulation électrique maximale : s'il y a un incrément de la force, c'est que le muscle n'était pas activé de manière véritablement maximale lors de la contraction volontaire. Des études ont en effet montré que certains sujets ne sont pas capables, pour des muscles bien précis, d'activer maximalelement la totalité des UM.

Je vais vous rendre compte à présent d'une expérimentation dont j'ai été, malgré moi, le propre sujet et qui illustre bien, à mon sens, les effets du désentraînement. Immobilisé pendant six semaines, contre mon gré bien sûr, j'en ai profité pour voir si, après alitement, j'étais encore capable d'activer le muscle triceps sural de manière maximale. Les résultats montrent que la force maximale développée a diminué et, de plus, la superposition de la stimulation électrique à la contraction volontaire révèle un incrément de force qui n'était pas présent avant l'alitement. Ainsi, aux effets d'atrophie musculaire et de diminution du niveau de la force, s'ajoute une « désadaptation » nerveuse, puisqu'il m'a été impossible d'activer maximalelement ce groupe musculaire.

Une étude que nous devons à Kitai et Sale (1989) permet de montrer que les adaptations nerveuses sont importantes et qu'il peut y avoir des adaptations de la force du muscle sans modifications de ses propriétés contractiles. Ces auteurs ont ainsi étudié l'évolution du couple de forces développé par le triceps sural lors d'une contraction isométrique et après un entraînement qui consistait à faire des contractions isométriques sous un angle de 90 degrés. Comme Thépaut-Mathieu et coll. (1988), dont nous avons présenté plus haut les travaux, ces auteurs ont constaté qu'à l'angle d'entraînement, le gain de force était supérieur par rapport aux autres angles testés. Mais ce qui est remarquable, c'est qu'ils ont également testé les modifications éventuelles des propriétés contractiles du muscle par la stimulation électrique. Or, pour celle-ci, on ne trouve nulle augmentation de force, comme celle enregistrée lors de



la contraction volontaire ; ce qui signifie que les adaptations ne sont pas présentes au niveau musculaire proprement dit, mais plutôt au niveau nerveux.

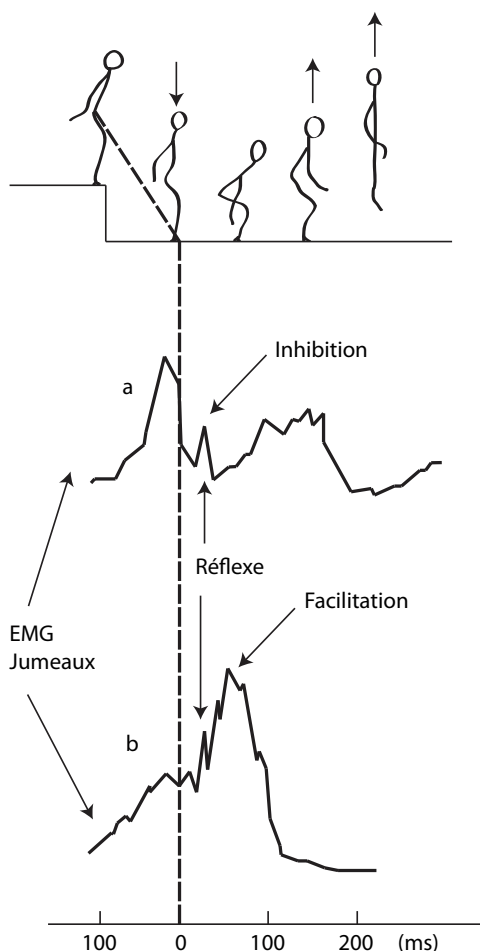
Comment peut-on expliquer que l'on puisse obtenir des gains de force sans véritable adaptation des éléments contractiles du muscle ? J'ai évoqué plus haut le fait que les sujets peu entraînés pouvaient améliorer le recrutement de leurs UM lors d'une contraction. J'ajouterai qu'avec l'entraînement, la force d'un groupe musculaire peut également croître, tout simplement grâce à une meilleure coordination des muscles synergistes : l'entraînement améliorant par exemple le fonctionnement de certains muscles fixateurs de l'articulation, les muscles agonistes peuvent, de ce fait, développer une force plus importante. On peut également imaginer – et ce sont des propositions qui ont déjà été émises – que les sujets peu accoutumés aux contractions musculaires intenses activeraient, dans ces états, la musculature antagoniste, ce qui tendrait à inhiber la musculature agoniste ; l'entraînement permettrait alors de relâcher davantage les antagonistes, au bénéfice de la force développée par les agonistes. Certains auteurs ont même pensé, notamment en ce qui concerne les gains de force pour un angle donné, à d'autres mécanismes d'adaptation : les récepteurs tendineux de Golgi pourraient réduire leur activité inhibitrice, permettant ainsi un développement plus important de la force. Ceci reste cependant à démontrer et c'est selon moi peu probable pour des tensions qui ne dépassent pas les tensions maximales isométriques.

Tels sont les mécanismes qui sont habituellement évoqués pour rendre compte de l'augmentation de la force maximale en l'absence d'hypertrophie musculaire. Mais la force n'est pas le seul paramètre qu'il est intéressant d'optimiser par les techniques de musculation. La vitesse l'est aussi pour un très grand nombre de sports. Komi (1986) a ainsi comparé l'installation de la force isométrique, « la montée de force » des sujets sédentaires et des sujets sportifs. La différence de pente est manifeste et le tracé électromyographique qui confirme cette différence met en évidence que l'athlète entraîné a une activité beaucoup plus intense en début de recrutement que le sédentaire. Cette constatation laisse supposer un plus grand recrutement d'UM à ce niveau et, pourquoi pas (mais cela reste à démontrer), une augmentation de la fréquence d'activation des UM.

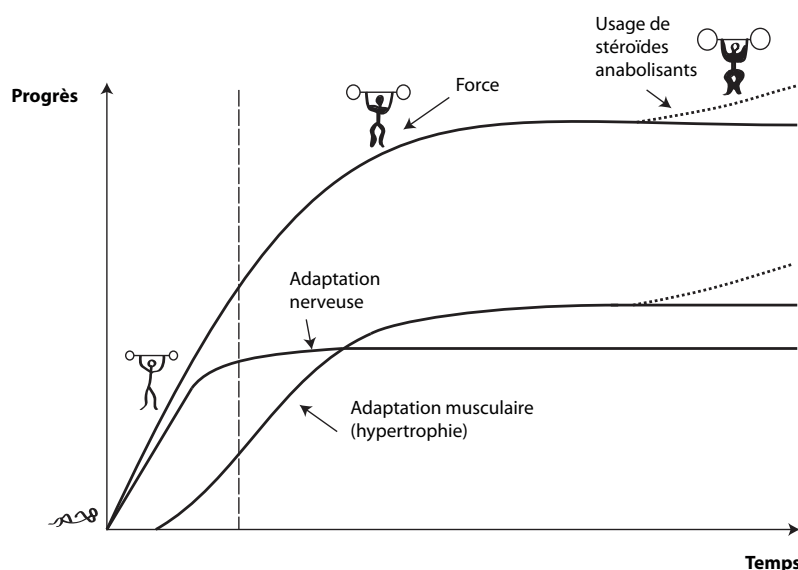
Ces types d'adaptations présents à la suite d'une période d'entraînement permettent un recrutement plus efficace des UM au sein du muscle et peut-être le développement de leur synchronisation et de leur fréquence d'activation. Une étude qui a montré précisément que l'activation des UM peut être mieux synchronisée, dans le temps, chez des athlètes entraînés comparés à des sédentaires, est celle réalisée par Milner-Brown et coll., en 1975, avec des haltérophiles. Ce qu'il faut retenir de cette expérimentation, c'est que les athlètes avaient une meilleure synchronisation de leurs UM que les sujets contrôles. Bien entendu, on pourrait objecter qu'il ne s'agit que d'une étude transversale et que, finalement, la meilleure synchronisation enregistrée chez les haltérophiles n'est en réalité que le résultat d'une sélection plutôt que d'un entraînement. Ces mêmes auteurs ont alors entraîné des sujets sédentaires par des contractions isométriques maximales pendant six semaines. Parallèlement à une augmentation de la force maximale de 20 %, ils ont constaté un gain de 127 % en ce qui concerne la synchronisation des UM. Il semble donc bien que l'entraînement puisse améliorer ce que nous appelons, en termes de terrain, la « coordination intramusculaire ».

On peut également rencontrer un autre type d'adaptation nerveuse consécutive à l'entraînement de la force, celui montré par Schmidbleicher et Gollhofer (1982) pour les exercices de « pliométrie lourde ». Ces auteurs ont comparé l'activité électromyographique des muscles jumeaux, lors de sauts en profondeur à partir d'une hauteur assez conséquente (1,10 mètre), chez des sujets sédentaires et des sujets entraînés. Si la figure 14 permet de constater que l'activité préparatoire à la réception au sol est plus intense chez le sédentaire (a) que chez le sujet entraîné (b), il est surtout remarquable de voir que les activités électromyographiques consécutives à l'impact (phase d'impulsion) sont davantage synchronisées chez le sujet entraîné. En effet, les réponses réflexes, ou supposées telles, évoquées suite à l'étirement des

jumeaux lors de l'impact des pieds au sol et qui apparaissent après un délai de 30 à 40 millisecondes, s'additionnent plus efficacement à l'activation volontaire chez le sportif. En revanche, chez le sédentaire, une inhibition de l'activité électromyographique semble contribuer au décalage dans le temps de l'activation volontaire par rapport aux réponses réflexes. D'un point de vue pratique, cela signifie que le sujet entraîné a un temps de contact au sol plus court que le sujet sédentaire, ainsi qu'une hauteur de rebond supérieure, consécutive à une meilleure restitution de l'énergie emmagasinée dans la composante élastique série. Il serait donc possible d'améliorer cette synchronisation entre l'activité volontaire et l'activité réflexe, et de réduire la phase d'inhibition constatée chez le sédentaire. Et ce n'est pas un des moindres aspects des adaptations nerveuses qui apparaît dans les gestes où la contraction excentrique précède la contraction concentrique. Comme c'est le cas de la majeure partie des



**Figure 14** – Activité électromyographique des muscles jumeaux, enregistrée pendant un saut en contrebas d'une hauteur de 1,10 mètre, chez un sujet non entraîné (a) et chez un athlète (b). Le trait pointillé représente le moment où les pieds entrent en contact avec le sol (modifiée d'après Schmidtbleicher et Gollhofer, 1982).



**Figure 15** – Représentation schématique de l'importance relative des adaptations nerveuses et intramusculaires (hypertrophie) au cours d'un programme d'entraînement de la force (modifiée d'après Sale, 1988).

gestes sportifs, on mesure ici toute l'importance de ce type d'adaptation.

Enfin, et pour clore cet entretien, je voudrais synthétiser l'évolution des adaptations liées au développement de la force, en reprenant le schéma proposé récemment par Sale (1988) et qui montre clairement que les deux formes d'adaptations (nerveuse et musculaire), qu'il lie ici simplement aux adaptations hypertrophiques, ont des évolutions fort diverses (figure 15), puisqu'on constate, en effet, que les adaptations nerveuses sont

très importantes au début d'une période d'entraînement, davantage chez un sédentaire que chez un athlète qui a déjà quelques années de pratique. Très rapidement, celles-ci commencent à plafonner et deviennent de plus en plus difficilement améliorables, tandis que le phénomène d'hypertrophie lié aux adaptations structurelles du muscle se fera plus lentement, pour ensuite se stabiliser de la même manière. L'amélioration constatée chez le sportif entraîné est en fait la somme de ces deux types d'adaptation. Au bout d'un certain nombre de mois ou d'années de pratique, et pour peu que le niveau d'entraînement ne soit pas modifié, on observera un plafond de performance, que certains tentent d'éviter en ayant recours à des stéroïdes anabolisants.

Si j'ai choisi d'évoquer les problèmes liés à l'adaptation spécifique due à l'entraînement, c'est qu'il m'était apparu, étant très impliqué dans le monde du sport, que beaucoup se trompaient quant à la conception et à la réalisation de la musculation spécifique. Il faut, sans crainte de me répéter, que l'ensemble des paramètres soit le plus proche possible de ceux qui caractérisent la discipline sportive considérée.

Je vous remercie de votre attention.

## BIBLIOGRAPHIE

DAVIES (C.), DOOLEY (P.), McDONAGH (M.) & WHITE (M.) – "Adaptation of mechanical properties of muscle to high force training in man", *J. Physiol.*, 1985, 365:277-285.

DESMEDT (J.E.) & GODAUX (E.) – "Ballistic contractions in man: characteristic recruitment of single motor unit of the tibialis anterior muscle", *J. Physiol.*, 1977, 264:673-693.

CARPENTIER (A.) et DUCHATEAU (J.) – « Étude biomécanique du saut en longueur : comparaison d'impulsions effectuées à partir de hauteurs différentes », *Science et Motricité*, 1990, 10 : 21-26.

DUCHATEAU (J.) et HAINAUT (K.) – « Adaptation du muscle humain et de ses unités motrices à l'exercice », *J. Biophys. et Méd. Nucl.*, 1981, 5 : 249-253.

DUCHATEAU (J.), LE BOZEC (S.) & HAINAUT (K.) – "Contribution of slow and fast muscles of triceps surae to a cyclic movement", *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1986, 55:476-481.

HAINAUT (K.) & DUCHATEAU (J.) – "Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise", *Sports Medicine*, 1982, 14(2):100-113.

KANEHISA (H.) & MIYASHITA (M.) – "Specificity of velocity in strength training", *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1983, 52:104-106.

KITAI (T.A.) & SALE (D.G.) – "Specificity of joint angle in isometric training", *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1989, 58:744-748.

KOMI (P.V.) – "Relationship between muscle tension, EMG and velocity of contraction under concentric and eccentric work", in: DESMEDT (J.E.) [Ed.] – *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*. Basel, Karger, 1973, vol. 1, p. 596-606.

KOMI (P.V.) – "Training of muscle strength and power interaction of neuromotoric, hypertrophic and mechanical factors", *Int. J. Sports Med.*, 1986, 7(suppl.):10-15.

MARINI (J.F.) VAN HOECKE (J.) et MATHIEU (C.) – « Adaptation du muscle à l'entraînement », in : *Le Renforcement musculaire*. Paris, INSEP-Publications, 1984, p. 55-78.

MERO (A.) & KOMI (P.V.) – "Electromyographic activity in sprinting at speeds ranging from sub-maximal to supra-maximal", *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1987, 19:226-274.

MILNER-BROWN (H.S.), STEIN (R.B.) & LEE (R.G.) – "Synchronisation of human motor units: possible roles of exercise and supraspinal reflexes", *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1975, 38:245-254.

NARDONE (A.), ROMANO (C.) & SCHIEPPATI (M.) – "Selective recruitment of highthreshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles", *J. Physiol.*, 1989, 409:451-471.

POULAIN (P.) et PERTUZON (E.) – « Étude comparative des effets de trois méthodes de musculation sur les propriétés contractiles et élastiques du muscle », *Ann. Kinésithér.*, 1988, 4:167-177.

POUSSON (M.) – *Effet de différents types d'entraînement sur la biomécanique des fractions passives et actives de l'élasticité-série*. Thèse de Doctorat, 162 pages, 1990.

POUSSON (M.), VAN HOECKE (J.) & GOUBEL (F.) – "Changes in elastic characteristics of human muscle induced by eccentric exercise", *J. Biomechanics*, 1990, 23:343-348.

SALE (D.G.), MAC DOUGALL (J.D.), ALWAY (S.E.) & SUTTON (J.R.) – "Voluntary strength and muscle characteristics in untraining men and women and male bodybuilders", *J. Appl. Physiol.*, 1987, 62:1786-1793.

SALE (D.G.) – "Neural adaptation to resistance training", *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1988, 20:S135-S145.

SCHMIDTBLEICHER (D.) & GOLLHOFER (A.) – "Neuromuskuläre Untersuchungen zur Bestimmung individueller Belastungsgrößen für ein Tiefspruntraining", *Leistungssport*, 1982, 12:298-307.

SHORTEN (M.R.) – "Muscle elasticity and human performance", *Med. Sport. Sci.*, 1987, 25:1-18.

THÉPAUT-MATHIEU (C.), VAN HOECKE (J.) & MATON (B.) – "Myoelectrical and mechanical changes linked to length specificity during isometric training", *J. Appl. Physiol.*, 1988, 64:1500-1505.

WALMSLEY (B.), HODGSON (J.A.) & BURKE (R.E.) – "Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats", *J. Neurophysiol.*, 1978, 41:1203-1216.

WINTER (D.A.) – *Biomechanics of Human Movement*. New-York, Wiley & Sons, 1979.

ZATZORSKY (V.) – *Les Qualités physiques du sportif*. Traduction INSEP, 1966, 138 p.

## QUESTIONS-RÉPONSES

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU (Laboratoire de biomécanique et de physiologie, INSEP) :** J'aimerais aborder le problème de la synchronisation des unités motrices. Cette notion signifie-t-elle que les unités motrices se mettent à battre de manière synchrone, autrement dit : ont-elles toutes leur potentiel d'action en phase ?

**Jacques DUCHATEAU :** Non, car c'est impossible. Quand on enregistre l'activité électrique des UM lors d'une contraction la plus rapide possible, on constate des décalages dans l'intervention temporelle des différentes UM ; elles ne sont pas mises en jeu en même temps. Mais on observe dans un muscle entraîné, par rapport à un muscle non entraîné, que la durée totale de l'activation musculaire est plus courte, ce qui signifie que ces décalages temporels sont moins prononcés. L'ensemble des UM est mis en activité dans un « timing » plus court, probablement lié à des modifications de leur seuil de recrutement. Autrement dit, on recrutera certaines UM plus tôt dans le mouvement et leur activité sera mieux synchronisée dans le temps. Finalement, elles parviennent à être mieux synchronisées. C'est dans ce sens que j'utilise ce terme de synchronisation.

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU :** Pour ma part, il me semble assez irréaliste de parler de synchronisation quand on considère que chaque motoneurone est un lieu d'intégration de multiples dépolarisations, d'intensité et d'origine variées, dont les effets dépendent du degré particulier d'excitabilité de chacun des « motoneurons-cibles ». La probabilité que deux motoneurons, dans ces conditions, déchargent de manière synchrone me paraît très faible. Dans le cadre d'un pool de motoneurons innervant un muscle dans son entier, cela devient, comme je l'ai déjà dit, irréaliste. Cette notion de « synchronisation » est souvent évoquée, à la suite notamment des travaux de Milner-Brown, Stein et Lee (1985). Mais cette référence me gêne pour deux raisons :

- Tout d'abord, les critères retenus par ces auteurs pour apprécier le degré de synchronisation posent problème, car ils sont équivoques. Et, selon l'appréciation que l'on peut en faire, on aboutit à des conclusions inverses : synchronisation maximale ou minimale.
- Ensuite, ces phénomènes dits de « synchronisation » ont été obtenus, par ces auteurs, sous stimulation électrique, me semble-t-il, donc dans des conditions éloignées des conditions physiologiques de dépolarisation d'une cellule excitable.

**Jacques DUCHATEAU :** C'est effectivement un problème de terminologie que l'on rencontre souvent dans le domaine du sport, où chacun a parfois tendance à forger ses propres concepts. Avez-vous un autre terme à proposer que « synchronisation » ?

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU :** Je proposerai un concept qui aurait peut-être l'avantage de faire le consensus. Il semble que l'on pourrait parler de « meilleur recrutement des unités motrices », car l'existence de ce phénomène en tant que tel a déjà été démontrée. Mais ce terme recouvre un mécanisme plus général. Synchronisation a certes une connotation plus précise...

**Jacques DUCHATEAU :** Il faudrait réfléchir pour savoir si ce concept peut vraiment faire le consensus terminologique, mais je ne suis pas *a priori* opposé à ce terme.

**Jean COLLOT-LARIBE (CREPS de Châtenay-Malabry) :** Vous avez précisé dans votre exposé que l'entraînement permettait d'augmenter la surface des fibres musculaires, mais pas leur nombre. Par ailleurs, vous avez souligné que la possibilité de changer des fibres rapides en fibres lentes faisait l'objet d'une littérature bien fournie. En revanche, vous vous êtes montré moins catégorique sur la possibilité inverse (conversion de fibres lentes en fibres rapides), en remarquant que seules quelques expériences avaient peut-être montré ce phénomène. Pouvez-vous nous donner quelques précisions à ce sujet ?

**Jacques DUCHATEAU :** En faisant référence à la littérature existant sur ce sujet, une conversion des fibres rapides en fibres lentes peut s'opérer assez facilement, alors que, dans l'autre sens, la majorité des auteurs s'accordent à dire que cela n'est pas possible, à l'exception d'une ou deux études. Des expériences

complémentaires sont nécessaires mais, manifestement, il est relativement facile de transformer des fibres rapides. Il semble que l'utilisation d'une fréquence d'activation faible transforme assez facilement les fibres rapides en fibres lentes, comme c'est le cas pour les activités d'endurance ou grâce à la stimulation électrique à faible cadence. L'inverse est en tout cas beaucoup plus difficile – en admettant que cela soit possible.

**Jean COLLOT-LARIBE** : Y a-t-il des fibres intermédiaires ?

**Jacques DUCHATEAU** : Bien entendu, et ce qui est habituellement proposé, c'est que les fibres intermédiaires pourraient jouer le rôle de transition entre les deux grands types de fibres.

**Hubert LENOIR (*Département du sportif de haut niveau, INSEP*)** : À propos de la composante élastique série, les travaux de Pousson ont révélé une augmentation de la compliance musculaire après entraînement. Sachant qu'il y a des fibres musculaires dans les parois vasculaires, quelle est la limite à ne pas dépasser dans l'entraînement d'adaptation cardiovasculaire ?

**Jacques DUCHATEAU** : Les travaux de Pousson montrent qu'il y a une augmentation de raideur après un entraînement excentrique et pliométrique du muscle squelettique. Cette adaptation est différente en fonction du type de contraction, puisque Poulain et Pertuzon ont constaté une diminution de raideur après entraînement par contractions concentriques. Par contre, je ne connais pas de travaux sur les adaptations de la raideur musculaire au niveau de la paroi vasculaire. Les muscles lisses s'adaptent-ils de la même manière que les muscles squelettiques ? C'est une question qui reste pour moi en suspens.

**Christian MILLER (*Unité de renforcement musculaire, INSEP*)** : Vous accordez beaucoup de vertu à l'entraînement excentrique, parce qu'il permet notamment de recruter préférentiellement les fibres rapides, ce qui est toujours intéressant, et qu'il a un effet sur la composante élastique, dans le sens d'une diminution de la compliance, ce qui ne l'est pas moins. Ne pensez-vous pas que ce type d'entraînement comporte des dangers et, si oui, quelles en sont les limites ?

**Jacques DUCHATEAU** : Je n'ai effectivement pas évoqué les effets parfois dangereux de certaines méthodes d'entraînement que l'athlète doit utiliser pour atteindre le haut niveau, à condition bien sûr d'y être préparé. Plus directement, certaines études ont montré que l'utilisation des méthodes d'entraînement de type excentrique, et probablement pliométrique, peuvent induire des dégradations au niveau du tissu musculaire. Ceci m'amène à faire quelques observations que je pense importantes :

- S'il est exact que certains ont montré des myofibrilles déchirées et des sarcomères modifiés après une séance d'entraînement excentrique, j'attends toujours que l'on me montre ce type de modifications chez un athlète qui s'est entraîné pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois en utilisant ce type de contraction.
- Au début, n'importe quel type d'entraînement musculaire engendre des altérations morphologiques du tissu musculaire.
- En outre, nous savons tous que la reprise de la musculation, même concentrique, après une période d'inactivité, provoque chez le sportif confirmé des douleurs musculaires pendant plusieurs jours.
- Ces dégâts musculaires provoqués peuvent sans aucun doute être mis en évidence par des coupes histologiques, mais à un niveau moindre que ceux observés par la contraction excentrique.

Ce qui est en réalité le plus intéressant – et sans doute le plus important –, c'est de voir comment le muscle s'adapte, car je ne suis pas certain qu'après plusieurs séances de travail excentrique, celui-ci présente encore des altérations aussi prononcées. Au-delà de cet aspect musculaire, les autres risques liés à la pliométrie et à la musculation excentrique avec des charges élevées se situent au niveau tendineux



et articulaire. Ceci est indiscutable, mais ce sont les risques de tout entraînement de haut niveau. Faut-il rejeter *a priori* des méthodes et des techniques d'entraînement plus efficaces pour le haut niveau, sous prétexte qu'elles comportent des risques de blessures musculaires ou tendineuses ? L'athlète de haut niveau faisant toujours le même choix, la solution dépend alors essentiellement de l'entraîneur. S'il sait mettre en place une préparation musculaire de base, s'il sait donner au muscle le temps de s'habituer progressivement à ces types de charge, s'il n'est pas pressé et s'il adopte cette véritable prévention, il limitera d'une manière très conséquente les risques de traumatisme ; il les minimisera au maximum à défaut de les éliminer totalement.

**Jacques VAN HOECKE (Laboratoire de biomécanique et de physiologie, INSEP) :** Dans les résultats dont vous faites état par rapport à l'excentrique, les UM étaient recrutées en balistique. Il me semble que cela doit être cohérent avec ce que rapporte Friden dans cette forme d'exécution de geste : il trouvait que les fibres de type H étaient sollicitées préférentiellement – et cela d'autant plus que l'entraînement avait duré longtemps. Avec l'entraînement, on met en place un recrutement des unités motrices qui « savent faire face » à des tensions très élevées. C'est ce qui se passe dans l'excentrique, au bout d'un certain temps et certainement pas dès le premier entraînement. D'ailleurs, comme vous le dites, après le premier entraînement, en général, on ressent des douleurs musculaires...

**Jacques DUCHATEAU :** ... douleurs qui disparaissent ; ce qui montre bien que le muscle s'adapte. S'il est vrai que le recrutement d'unités motrices pendant les contractions isométriques et concentriques a fait l'objet de multiples recherches, il serait judicieux, à présent, d'étudier les modifications éventuelles de ce recrutement dans d'autres situations. Cela peut avoir des implications intéressantes pour les gestes excentriques ou excentriques-concentriques, qui caractérisent de nombreuses disciplines sportives.

**Julien LECOINTE (Kinésithérapeute) :** Sans être expert en ce domaine, je prolongerai votre réponse par une question d'ordre traumatologique. Qu'en est-il au niveau du tendon ? Suit-il éventuellement cette évolution que l'on connaît sur le muscle ?

**Jacques DUCHATEAU :** Certaines études ont montré chez l'animal que le tendon pouvait également s'adapter à l'entraînement, mais moins rapidement que le muscle. Là réside peut-être le plus grand danger, quand il y a déséquilibre entre le muscle et ses tendons. Ce cas de figure apparaît principalement chez les athlètes qui ont pris des anabolisants et dont le développement très rapide de la masse musculaire peut provoquer des ruptures tendineuses, le tendon n'ayant pas eu le temps de s'adapter à l'accroissement de la force musculaire. Il existe donc certainement un risque et, à l'évidence, la force doit s'acquérir très progressivement.

**Julien LECOINTE :** Et qu'en est-il au niveau de l'os ?

**Jacques DUCHATEAU :** Je n'ai aucune connaissance précise de ce problème. On sait que l'os s'adapte aux contraintes qui lui sont imposées et je suppose donc qu'il s'adaptera, par exemple, aux exercices de musculation excentrique et pliométrique. Toutefois, je ne connais à ce jour aucune étude sur la question.

**Jean KELLER (UFR STAPS, université Paris V, Lacretelle) :** A-t-on une idée de la façon dont se déroule une contraction excentrique au niveau des ponts actine-myosine et existe-t-il des travaux qui auraient été menés sur ce sujet ?

**Jacques DUCHATEAU :** Il a été proposé que, lors d'une contraction excentrique, des ponts lâcheraient et se reformeraient un cran plus loin et ainsi de suite. On peut penser que cela se passe de la manière suivante : le pont cède et, comme à ce moment-là l'activation est continue, il se reforme un peu plus loin. Mais je ne pense pas que l'on puisse en dire plus en réponse à cette question. Quant à savoir comment les choses se passent au niveau de l'interaction actine-myosine, il s'agit d'un problème qu'il n'est pas possible d'appréhender dans l'état actuel du développement des méthodes d'investigation. Par contre, lorsqu'un



muscle est relâché et qu'il est étiré par l'action d'une force extérieure ou de la musculature antagoniste, les filaments d'actine glissent sans réelle contrainte entre les filaments de myosine. En effet, dans ce cas il n'y a pas d'activation musculaire et aucun « pont » formé entre les deux types de filament.

**Jacques VAN HOECKE** : Il est vrai qu'on a du mal à se représenter en même temps un glissement des ponts et deux points d'insertion qui s'éloignent ! Ce n'est pas si facile que cela à comprendre... Faisons le point sur ce que l'on sait :

- Les ponts se cassent au fur et à mesure ; ils ont donc une durée de vie finie.
- Il y a des sites élastiques au niveau de la tête de méromyosines et donc une possibilité de déformation : une grande partie de la composante élastique série peut être située à ce niveau-là.
- Le coût énergétique de la contraction excentrique est moins élevé que celui de la contraction concentrique, car c'est une force extérieure qui la provoque.

Je ne crois pas que l'on puisse en dire plus, actuellement, et une représentation graphique ou schématique claire et explicite du phénomène est encore lointaine.

**David OBADIA (Professeur de sport, entraîneur de tennis de table)** : Vous avez évoqué l'électromyostimulation pour augmenter la force. Que pensez-vous de l'utilisation de cette technique pour aider à la récupération ?

**Jacques DUCHATEAU** : Personnellement, je ne connais pas bien la méthode utilisée par les auteurs auxquels vous faites référence et il m'est donc difficile de me prononcer. Ce que je peux dire, c'est que l'intensité de la stimulation doit être relativement faible pour ne pas engendrer des effets de fatigue complémentaire. Quelle intensité utilisent-ils ?

**David OBADIA** : Une intensité très faible...

**Jacques DUCHATEAU** : Cela est alors cohérent avec les études biochimiques qui ont très bien montré qu'on récupère mieux d'un effort après une compétition en réalisant une activité musculaire relativement faible qu'avec un repos total. Les hommes de laboratoire l'ont située entre 30 et 60 % du  $VO_2$  max. Si donc ces auteurs utilisent une intensité d'électrostimulation qui correspond à ces zones, il pourrait s'agir d'un moyen de récupération. Toutefois, je ne connais aucune étude ayant réellement testé, avec des paramètres objectifs, l'efficacité de l'électrostimulation pour la récupération.

**Georges POUMARAT (UFR STAPS, université de Clermont-Ferrand)** : Concernant l'électrostimulation, je dirais qu'actuellement nous jouons aux « apprentis sorciers » car, si l'on est loin de maîtriser tous les paramètres de cette technique de renforcement musculaire, on est encore plus loin pour ce qui est de la spécificité de ses effets tels qu'on sait les obtenir par l'entraînement classique. Aussi, ne pensez-vous pas que le choix de l'emplacement des électrodes, leur taille, le type de courant et, plus encore, la localisation de l'effort lorsqu'on teste le sujet en force maximale, puissent inférer des résultats et, par conséquent, contribuer à sous-estimer l'impact de l'électrostimulation par rapport à la contraction volontaire ?

**Jacques DUCHATEAU** : En effet, si certaines études ont trouvé des gains de force moindres par l'électrostimulation que par les contractions volontaires, c'est que les différents paramètres n'ont pas été optimisés et que l'on n'a pas atteint le degré d'intensité suffisant pour mettre en jeu toutes les UM. Si on peut l'envisager pour quelques sports, l'électrostimulation ne peut pas être pour autant un moyen d'entraînement spécifique pour la majorité des gestes athlétiques. Rappelons que l'on ne peut pas atteindre, en électrostimulation, les tensions musculaires comparables à celles que l'on obtient, par exemple, dans les exercices de pliométrie, qui reflètent bien mieux ce qui se passe sur le terrain. Si l'électrostimulation est une technique tout à fait envisageable dans le cadre de l'entraînement général, elle ne l'est certainement pas dans la phase spécifique. On pourrait également l'utiliser dans un but

psychologique : si l'athlète croit à l'électrostimulation et que cela constitue un apport positif dans sa préparation mentale, je ne vois pas de contre-indication à l'introduire, à condition que l'entraîneur soit bien conscient de ce but et qu'il ne cherche pas à obtenir des adaptations et des effets physiologiques. Il est important de souligner que des auteurs ont montré un effet physiologique à très court terme, consécutif à une courte période d'électrostimulation. Mais l'idée que la stimulation électrique d'un groupe musculaire préalable à la réalisation du geste sportif puisse engendrer, dans certaines conditions, une amélioration de la performance, demande encore des confirmations.

**Henri HÉLAL (Département de la formation aux métiers du sport, INSEP)** : Utiliser le renforcement musculaire en sport signifie augmenter le potentiel de force de l'athlète dans le but d'améliorer directement ou indirectement la performance. Toutes les expérimentations sérieuses mesurent très objectivement des gains de force. Or, un entraînement prépare toujours à des objectifs clairement fixés dans le temps. Des études ont-elles été menées pour mettre en évidence la dynamique de ces gains de force et la date d'apparition des gains maximaux consécutifs, soit à un programme d'entraînement, soit plus simplement à la diminution du niveau de la charge de travail ?

**Jacques DUCHATEAU** : Il m'est franchement impossible de répondre à cette question intéressante et si importante pour un entraîneur. Notre connaissance des effets retardés nous vient principalement de la littérature en provenance de l'ex-Union Soviétique et dont, personnellement, je n'ai jamais pu étudier les bases scientifiques qui sous-tendent l'argumentation développée. D'après ces études, il semble qu'un certain délai soit nécessaire entre la période d'entraînement et la manifestation du gain de force dans la discipline sportive. C'est cela que ressentent empiriquement les athlètes et les entraîneurs : un décalage entre le moment où l'on progresse en force maximale et celui où le transfert s'opère dans le geste du sportif. Mais je ne connais pas d'études qui aient clairement montré cette évolution sur la base d'expérimentations réalisées en laboratoire.

**Henri HÉLAL** : Que pensez-vous des travaux de Gilles Cometti, qui propose, concernant les « effets retardés », des délais différenciés en fonction du type de sollicitation musculaire : excentrique, isométrique, dynamique ou stato-dynamique ?

**Jacques DUCHATEAU** : Je ne pense pas que cette proposition de Gilles Cometti soit réellement faite sur la base d'une expérimentation. Il s'agit plutôt, à mon avis, d'une conception et d'un raisonnement théoriques établis à partir de la littérature sur le sujet. Je ne connais pas les bases scientifiques objectives qui permettraient d'affirmer de telles propositions. Mais il a probablement entraîné des athlètes, il les a soumis régulièrement à des tests et il a constaté qu'ils obtenaient de bons résultats dans telle ou telle condition d'entraînement. C'est ce que fait habituellement l'entraîneur qui fonctionne par essais et erreurs, qui teste des méthodes, des techniques et des procédures, puis qui retient adroitement ce qui a bien marché, éliminant ce qui lui paraît manquer d'efficacité. Cette démarche n'est pas toujours fondée sur des arguments scientifiques. En ce qui concerne le procédé stato-dynamique, je suis réservé quant à sa place dans la succession des méthodes d'entraînement, quelle que soit la discipline sportive. Si je suis d'accord pour placer « le stato-dynamique » en fin de programme d'entraînement pour les disciplines qui demandent ce type de contraction, je préfère, par contre, utiliser la pliométrie avant et pendant la période de compétition dans les disciplines caractérisées par le cycle étirement-détente. Personnellement, en athlétisme, j'utilise la pliométrie deux à trois jours avant la compétition, avec de bons résultats. Il m'est arrivé d'en faire encore la veille de l'épreuve, en petite quantité bien entendu, pour avoir des effets positifs sur mes performances. Affirmer qu'on ne fera rien de bon en compétition parce qu'on fait de la pliométrie trois jours avant n'est absolument pas fondé. En tant qu'athlète, c'est toujours ainsi que j'ai pratiqué, parce que c'est ainsi que je le ressentais. Si Gilles Cometti a une conception très rigide de l'ordre des différentes phases d'entraînement musculaire indépendamment de la discipline sportive, je ne suis pas persuadé qu'elle soit véritablement efficace dans tous les cas ; s'il s'agit d'un sprinter, je comprends

très bien que, pour entraîner spécifiquement le quadriceps lors du départ, il utilise « le stato-dynamique », puisqu'à ce niveau il s'agit bien d'une contraction de type statique-dynamique.

**Michel PRADET (*Département de la formation aux métiers du sport, INSEP*)** : Que pensez-vous du travail concentrique volontaire à l'approche des compétitions ?

**Jacques DUCHATEAU** : Je ferai le même type de réponse : à l'approche des compétitions, il faut que le travail soit spécifique. Si votre discipline est caractérisée par des contractions concentriques, c'est ainsi qu'il faudra pratiquer ; si, par contre, votre discipline n'est pas caractérisée par ce type de contraction (par exemple en athlétisme), il faut s'en écarter. Pour ma part, j'essaie d'utiliser des formes de travail qui sollicitent le cycle « étirement-détente », caractéristique de la plupart des disciplines athlétiques. Cela ne signifie nullement que, sous prétexte de spécificité, j'abandonne totalement les autres formes de musculation : tout entraînement comporte des pourcentages différents d'exercices généraux, orientés et spécifiques, répartition qui évolue au fur et à mesure de la saison. Mais quand l'athlète doit faire du travail spécifique, « tout » doit être spécifique, du mouvement au type de contraction, des charges aux vitesses d'exécution utilisées.

**Jacques QUIÈVRE (*Unité de renforcement musculaire, INSEP*)** : J'aimerais poser une question sur la spécificité de la vitesse. Posons le préalable que les unités motrices capables de développer les niveaux de force les plus élevés ont également les plus grandes vitesses de contraction. Lorsqu'on travaille dans les gammes de charges exigeant de 80 à 100 % de la force maximale isométrique et induisant un recrutement de toutes les unités motrices, avec une fréquence de battements quasi maximale, il semblerait que l'on favorise également leur vitesse de contraction. Qu'est-ce qui empêche de penser que ce type de travail puisse favoriser l'accroissement de la qualité de vitesse ? Sachant que ce que vous avez dit des haltérophiles n'est pas partagé par l'ensemble des entraîneurs ; certains pensent en effet que l'haltérophile a des qualités de vitesse, sur de courtes distances certes, mais des qualités de vitesse non négligeables.

**Jacques DUCHATEAU** : À propos des qualités de vitesse de l'haltérophile, n'oublions pas qu'il a son poids de corps à mobiliser ; on ne se trouve donc pas, dans le cadre de la relation force-vitesse, vers des valeurs de charge nulle. Je pense que les haltérophiles sont généralement très dynamiques avec des charges importantes, par rapport aux charges plus légères. Alors, qu'est-ce qui les empêche d'améliorer leur vitesse gestuelle ? Des modifications au niveau musculaire : problèmes de compliance et probablement problèmes de recrutement des unités motrices. Il est possible qu'on ne recrute pas les UM de la même manière selon qu'on exécute un mouvement avec une charge élevée ou sans charge. Pour l'instant, dans notre laboratoire, nous faisons des mouvements dynamiques contre des charges différentes et nous comparons un muscle lent à un muscle rapide ; nous observons des modifications certaines dans l'électromyogramme. On ne commande pas de la même manière un mouvement sans charge et un mouvement avec charge, même si on veut exécuter le geste le plus rapidement possible. Ce sont certes des expériences préliminaires mais il me semble, d'après le type de tracés électromyographiques que j'ai pu observer dernièrement, qu'il devrait y avoir des modifications quand on fait des mouvements rapides, sans charge et avec charge : dans les deux cas, on fait un mouvement rapide, mais les patterns d'activité des muscles lents et rapides sont différents. Il y a probablement des adaptations, également, à ce niveau-là.

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU (*Laboratoire de biomécanique et de physiologie, INSEP*)** : On peut peut-être concevoir ce problème d'une autre manière. Il est vrai que lorsqu'on fait un effort maximal – qu'il soit sous charge maximale ou sous vitesse maximale –, toutes les unités motrices recrutables sont activées. Et s'il y a une spécificité dans l'exécution du geste, à charge très lourde ou à charge très faible, elle n'est peut-être pas en rapport avec l'adaptation au recrutement des unités motrices, mais plutôt avec une modification dans la mise en jeu de la synergie musculaire. Il faut aussi se référer à l'ensemble du corps,

au jeu agoniste-antagoniste, au jeu de l'équilibre postural, qui me semble complètement déterminant. Quand on fait un mouvement très lent, on est dans une certaine posture et on a certaines contraintes mécaniques, postures et contraintes qui sont complètement différentes dans un geste balistique. Ne vous paraît-il pas important d'envisager le problème également de cette manière ?

**Jacques DUCHATEAU** : Je suis assez d'accord avec votre observation et c'est ce que j'ai voulu dire en parlant de « patterns d'activité des muscles lents et rapides différents ». On a l'impression que la synergie est modifiée et, selon que l'on mobilise ou non une charge, la mise en jeu est en effet différente pour les deux types de muscles, et donc pour leurs UM. De plus, dans un mouvement très rapide sans charge, le temps d'activation des UM est très bref, alors qu'il est beaucoup plus long pour une contraction isométrique maximale.

**Jacques VAN HOECKE** : C'est à l'entraîneur, et donc au psychologue, que je m'adresse maintenant. Vous parlez de possibilités d'activation maximale, donc de surcroît de force que pourrait amener éventuellement l'entraînement. Ce phénomène est-il sous la dépendance de la concentration, d'une motivation particulière ou d'un cri, comme l'avaient montré les vieux travaux d'Ikka, en 1960 ? Existe-t-il, dans la littérature, des travaux dans ce domaine et, si non, s'oriente-t-on vers ce type d'expérimentation ? Parce que dans ce cas-là, c'est vraiment aux structures supérieures de « travailler » et « d'apprendre » à travailler différemment.

**Jacques DUCHATEAU** : Plusieurs auteurs, en effet, semblent dire que c'est au niveau des centres supérieurs que « cela se passe » et que c'est la mise en jeu de la commande centrale que l'on peut améliorer. Si certains l'ont montré sous hypnose, des études complémentaires sont nécessaires pour véritablement identifier et comprendre ces mécanismes. Et, vous en conviendrez, il s'agit d'un champ d'expérimentation d'une richesse incomparable, qui laisse bien augurer des progrès qu'il nous reste tous à accomplir, chercheurs et entraîneurs réunis.

## DÉBAT

### **Chantal THÉPAUT-MATHIEU**

Laboratoire de biomécanique et de physiologie  
INSEP

### **Jacques DUCHATEAU**

Laboratoire de biologie générale  
Université libre de Bruxelles (Bruxelles)

### **Alain LACHÈZE**

Groupe Musculation  
École interarmées des sports (Fontainebleau)

### **Serge LE BOZEC**

Laboratoire de la motricité  
CNRS UA 385  
CHU Pitié-Salpêtrière

### **Régis MOLLARD**

Département médical  
INSEP  
UFR biomédicale des Saints-Pères  
CNRS UAR 220

### **Claude MONOT**

Entraîneur national des épreuves combinées  
Fédération française d'athlétisme

### **Georges POUMARAT**

Groupe biomécanique et instrumentation  
UFR STAPS  
Université de Clermont-Ferrand

### **Michel PRADET**

Département de la formation  
INSEP

### **Jacques VAN HOECKE**

Groupe Analyse du mouvement  
UFR STAPS  
Université de Bourgogne

*Débat préparé et dirigé par*

### **Christian MILLER et Jacques QUIÈVRE**

Unité de renforcement musculaire  
INSEP

**Christian MILLER :** Le concept général de la mesure permet de poser trois types de questions autour desquelles je propose que s'organise notre réflexion.

- Quand on mesure la force, que mesure-t-on en réalité ? Est-ce bien le concept de force musculaire, qualité physique à multiples facettes que l'on abordera alors ?
- Pourquoi mesure-t-on la force et quelle est la signification de cette mesure ?
- Comment, avec quels outils et quelle fiabilité, peut-on mesurer la force ?

Et, pour véritablement lancer le débat, cette première question : est-ce que le seul indicateur de la force, en tant que grandeur mécanique, peut suffire à rendre compte de la force musculaire, en tant que qualité physique ?

**Jacques VAN HOECKE :** Il faut préalablement préciser que l'on ne sait pas véritablement mesurer la force musculaire. Pour le faire, il faudrait, dans des conditions extrêmement précises, implanter des capteurs de force sur le tendon d'un muscle. En dehors de cette situation, il s'agit d'une mesure plurifactorielle, qui est en réalité la résultante du recrutement extrêmement subtil et complexe d'un très grand nombre de muscles.

**Georges POUMARAT :** La première idée que je retiendrais alors, c'est de dire qu'il n'existe pas de force générale. On parlera de force spécifique d'un groupe musculaire, dans une posture, un mouvement et un seuil de charge donnés. En sport, on mesure indirectement cette force en l'assimilant à la valeur de la charge mobilisée dans un exercice ; c'est donc la force des principaux muscles sollicités dans un mouvement que l'on mesure. Comme de plus, on ne l'exprime pas en newtons mais en kilogrammes soulevés, on mesure l'effort permanent de terminologie que doivent faire, pour se comprendre, les chercheurs et les entraîneurs.

**Régis MOLLARD :** À ce problème, s'ajoute celui de la standardisation de la mesure, toujours très complexe quand on utilise les gestes sportifs. Les deux remarques précédentes soulignent l'importance d'une définition rigoureuse des conditions dans lesquelles se fait la mesure de la force. L'expérience montre que c'est généralement très difficile, car il faut également maîtriser la part de la motivation, qui

est extrêmement importante. En médecine de réadaptation, on a plutôt recours à une évaluation globale pour qualifier les faits d'une rééducation et il est donc très important, quand on fournit un résultat ou lorsqu'on fait une recommandation, de préciser les conditions de la mesure.

**Serge LE BOZEC** : Ce problème de la standardisation doit également intégrer la notion de lieu. Dans le travail qu'elle a mené sur la mesure de la force isométrique, Chantalle Thépaut-Mathieu a obtenu jusqu'à 30 % de différence avec les mêmes sujets, suivant que le test se déroulait au CHU Pitié ou à l'INSEP. Si, pour la mesure de la force isométrique, on obtient néanmoins un niveau de standardisation très acceptable, on comprend donc toute la complexité de la mesure dans les efforts dynamiques.

**Jacques QUIÈVRE** : Quand on mesure la force, isométrique ou anisométrique, on mesure toujours une montée de force plus ou moins pentue et une force maximum, ou pic de force, qui s'effondrera ensuite pour atteindre des valeurs nulles. L'expression de la force dans un mouvement est donc une cinétique que ne peut pas exprimer un seul point. Pour qualifier ou définir la qualité exprimée par le sujet vis-à-vis de l'ergomètre de mesure, il faut prendre en compte, bien entendu, le niveau maximum de la force, mais aussi la manière dont il a été atteint et, ce qui me semble tout aussi important, la capacité du sujet à maintenir des niveaux de force élevés durant le mouvement. Ces trois paramètres doivent être identifiés pour avoir une représentation complète de la force en tant que qualité physique du sujet.

**Georges POUMARAT** : Dans certains sports, la mesure de la force peut être d'une aide très précieuse pour l'entraîneur, si les paramètres temporels sont pris en compte. Ainsi, en haltérophilie, les mesures réalisées sur une plate-forme de force permettent de décrypter, puis de décrire le comportement moteur du sujet, autrement dit d'évaluer son efficacité technique dans les différentes phases d'un épaulé, par exemple, ou d'un arraché de barre. Les haltérophiles de haut niveau arrivent ainsi à obtenir une excellente reproductibilité de leurs gestes.

**Régis MOLLARD** : Ceci est tout à fait exact et vaut pour d'autres spécialités. Nous avons ainsi exploré et analysé l'efficacité technique des lanceurs de poids au moyen de plates-formes de force. Les quelques indices utilisés, qui sont des résultantes d'appui et de durées des impulsions, corrèlent très fortement (.95) avec la performance de lancer, ce qui indique qu'ils sont en relation avec le geste technique. Luc Viudès, lanceur de poids de très haut niveau avec lequel nous avons travaillé, avait deux styles qui privilégiaient, l'un la force, et l'autre la vitesse. Ces deux techniques se caractérisaient chacune par des signatures différentes au niveau des appuis. Finalement, la difficulté de ce type de mesure est de « raccrocher » ce que l'on mesure au contact pied-sol à une gestuelle technique globale. Ce n'est certainement pas facile à réaliser, mais c'est une démarche qui gagnerait à être généralisée.

**Jacques DUCHATEAU** : Je suis tout à fait d'accord avec ce point de vue, car on sait depuis quelques années qu'il y a peu de relations entre la force isométrique et celle que l'athlète peut produire dans son activité dynamique. Une seule mesure est insuffisante pour évaluer le potentiel d'un athlète et la mesure de l'impulsion de la force est aussi importante, sinon plus, que la force maximale. Ainsi, des sauteurs en hauteur de « type vitesse » et de « type force » peuvent obtenir les mêmes résultats en fosbury, mais avec des durées d'impulsion différentes ; mesurer celles-ci le plus spécifiquement possible devient une voie riche d'enseignements et de progrès.

**Serge LE BOZEC** : S'il est vrai que, sur une plate-forme de force, on peut décrire le mouvement à partir de la composante verticale des forces et de ses fluctuations, quel est le pourcentage d'erreurs et que représente-t-il ? L'expérimentation d'Yvon Brenière, au laboratoire de biomécanique d'Orsay, avec des haltérophiles, est assez édifiante. À partir de la mesure de la composante RZ, il a déterminé la force maximale du sujet à un instant donné, lors de l'exercice classique du « soulevé de terre ». Il a obtenu une très bonne évaluation du niveau de la force, mais avec une erreur de plus ou moins 5 à 10 % rapportée à la force maximale. Cette marge d'erreur est considérable, en regard de l'estimation que sait en faire



un athlète qui s'entraîne régulièrement et dont l'erreur se situera à plus ou moins 2 %. L'utilisation des techniques et des ergomètres les plus sophistiqués doit donc nous inciter plus que jamais à une approche critique des phénomènes observés et une évaluation de la représentativité de l'erreur de mesure.

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU** : Je voudrais mettre l'accent sur l'interprétation des gains de force que l'entraîneur peut observer avant et après entraînement, grâce à l'utilisation d'un appareil ou d'un ergomètre très sophistiqué. Entre le pré-test, les tests intermédiaires et le post-test, l'athlète s'entraîne ailleurs que sur l'outil de mesure. Si l'on observe par exemple un gain de 10 % après trois semaines, puis de 20 % trois semaines plus tard, etc., l'entraîneur est autorisé à penser que le programme d'entraînement suivi est bien adapté à cet athlète. Or, on peut faire l'hypothèse que lorsqu'il y a des tests intermédiaires, le gain de force mesure aussi (ou seulement ?) les progrès réalisés par le sujet dans l'utilisation de l'ergomètre. Sur ce thème, Jacques Duchateau a réalisé un très beau travail, au cours duquel il a comparé les gains de force de deux groupes de sujets, un qu'il a entraîné, l'autre de contrôle, soumis tous deux à des tests intermédiaires. Il a observé des gains de force chez le groupe contrôle qui ne s'entraînait pas, gains bien entendu inférieurs au groupe entraîné, mais gains néanmoins significatifs. Les sujets du groupe contrôle ont appris, au cours des tests intermédiaires, à « mieux se servir de l'appareil ». Pour donner aux entraîneurs une interprétation fiable des indices mécaniques mesurés sur un ergomètre, il faudrait préalablement connaître le taux de progression quand on le manie seulement d'une manière occasionnelle.

**Serge LE BOZEC** : De même, ne doit-on pas occulter l'extrême complexité de la mesure liée à la technologie et à son degré de sophistication ? Les appareils sont nombreux sur le marché et même quand on s'est préalablement posé la question de savoir quoi mesurer et pourquoi, on se heurte rapidement aux problèmes de l'acquisition des données. Ainsi, pour l'enregistrement électromyographique, paramètre très utile et à ne pas négliger, les fréquences d'échantillonnage disponibles sur les appareils les plus en pointe sont très faibles (50 à 200 Hz). Ceci est nettement insuffisant pour les gestes sportifs dynamiques et il faudrait pouvoir disposer de fréquences d'échantillonnage de 1 000 à 2 000 Hz.

**Régis MOLLARD** : ... À condition, toutefois, de bien choisir l'accéléromètre, qu'il soit bien placé par rapport à l'axe de la mesure envisagée, qu'il ne bouge pas de façon relative et que le mouvement soit suffisamment simple. Dans les mouvements complexes, on ne sait pas rassembler toutes ces conditions et qualifier la force que l'on mesure.

**Serge LE BOZEC** : Finalement – et pour synthétiser le problème –, cela revient à poser trois questions :

- Mesure-t-on la valeur absolue de la force ? Pour ma part, je pense plutôt qu'il s'agit d'une valeur relative, par rapport à l'évolution de la force sous l'effet de l'entraînement.
- Quelle durée doit-on considérer quand on mesure la force musculaire plutôt que la force isométrique maximale ? En effet, au-delà d'un certain temps, il y a apparition de la fatigue et diminution de la force.
- Quelle attitude doit-on avoir devant le développement technologique qui met à notre disposition des outils extrêmement sophistiqués ? Autrement dit : comment utiliser au mieux ces outils pour clarifier le problème central du développement de la force en sport et particulièrement le problème de la spécificité de l'entraînement ?

**Georges POUMARAT** : L'évolution technologique du matériel pose effectivement problème. En revanche, elle permet des avancées notables, comme par exemple une meilleure connaissance du pattern moteur des différents gestes sportifs, qui se traduit par une meilleure programmation des contenus des séances d'entraînement de la force. Mais il n'y a pas que la mesure, il y a également le mode de production de

la force qui doit être aussi évoqué. De ce point de vue, l'exemple de l'électrostimulation est flagrant. Un sujet non accoutumé à la stimulation électrique acceptera des intensités très faibles lors des premières séances puis, par accoutumance, des intensités beaucoup plus fortes. On ne pourra certainement pas conclure que les niveaux de force mesurés sont des gains dus à l'entraînement : le sujet s'est simplement adapté à la « charge de travail », qu'elle soit induite, ici, par la stimulation électrique ou par des charges additionnelles. En musculation classique, on discerne bien la phase d'adaptation aux charges de celle du gain effectif de force. Il faut donc éviter d'interpréter trop hâtivement, surtout dans les phases initiales d'un entraînement, ces gains de force « mirobolants », comme il a été fait pour les premiers travaux de Hettinger sur la musculation isométrique. Toute mesure des gains de force doit être replacée dans le contexte dynamique de la durée d'un entraînement et du niveau de pratique.

**Alain LACHÈZE :** En effet, en musculation, on sollicite la plupart du temps une chaîne musculaire dont on n'arrivera jamais à identifier avec objectivité la part réelle que prend chaque groupe musculaire qui la compose, tout au long de l'exercice : comment mesurer, par exemple, la contribution effective de muscles fessiers, spinaux, quadriceps et adducteurs dans le squat ? La mesure de la force est le plus souvent la mesure de la chaîne musculaire mobilisée et, indirectement, de la coordination inter-musculaire. Dans la pratique, on procède donc par des évaluations linéaires, en variant les angles, la charge additionnelle et le nombre de répétitions, pour évaluer la valeur des différentes composantes de la chaîne musculaire entraînée.

**Jacques QUIÈVRE :** Ces deux dernières remarques, qui nous ramènent « au terrain », me permettent de poser la question de la mesure autrement. La plupart des pratiques sportives sont des pratiques dynamiques de projection de son poids de corps et/ou d'un engin, et ce qui compte le plus en sport, en termes de mesure, c'est cette impulsion, cette force liée à la vitesse. Le but de tout renforcement musculaire consisterait alors à optimiser la capacité d'un sujet à générer des grandes vitesses. De ce point de vue, le concept de force musculaire rend-il compte de cette capacité que l'on veut développer et ne serait-il pas plus pertinent d'envisager des mesures de la puissance mécanique, révélatrice de la performance musculaire engagée dans la pratique sportive ?

**Christian MILLER :** La seule condition où la force, en tant que grandeur physique, rend bien compte de la capacité du muscle à générer du mouvement, c'est la contraction isocinétique, où la force est, à la valeur de la vitesse près, l'image de la puissance (l'isométrie étant un cas particulier d'isocinétisme à vitesse constante nulle). Lors d'une contraction non isocinétique, ce qui est le cas dans la quasi-totalité des situations sportives, la puissance semble un meilleur révélateur de la capacité musculaire engagée dans les activités sportives.

**Jacques DUCHATEAU :** Cette remarque est tout à fait pertinente car on se rend compte, dans la pratique, que des athlètes capables de développer des forces supérieures en isométrie ou dans des mouvements très lents, sont tout à fait incapables, dans des mouvements dynamiques, de générer une force importante. C'est effectivement la puissance qu'il faut mesurer et tester dans la plupart des disciplines sportives, mais pas dans toutes bien sûr.

**Régis MOLLARD :** Cet aspect trouve sa confirmation dans ce que nous avons observé lors des rééducations post-traumatiques des sportifs, qui étaient plutôt à dominante isométrique. Au terme d'un travail conséquent et après les mesures de vérification d'usage, le sportif reprenait presque normalement son entraînement. Or, bien qu'il soit guéri, rééduqué et de nouveau entraîné, les séquelles persistaient au cours de la pratique sportive. Les mesures que nous avons faites en isocinétique (mesure de la puissance, des moments de force pour un angle donné ou une vitesse donnée) montraient que ces sportifs, « remis dans le circuit normal d'entraînement », présentaient des déficits de puissance importants, alors qu'ils avaient retrouvé leurs indices maximum de force isométrique. Cet exemple nous montre combien il



faut diversifier les méthodes de renforcement musculaire et combien la manière dont on est capable de générer une force est importante.

**Jacques VAN HOECKE** : Vous posez la question du pourquoi de la mesure et des objectifs poursuivis. Ça n'est pas simple du tout, car cela revient à poser le problème du rapport que la mesure entretient avec le geste spécifique de compétition. C'est le débat sans fin de la validité d'une mesure quand il s'agit de sport de compétition. Et, à mon sens, c'est un faux débat, car la pertinence de la mesure doit être examinée en fonction de la demande de l'entraîneur. S'il a besoin d'un outil opérationnel lui permettant de gérer son entraînement et validé par le temps – parce qu'il utilise toujours cet outil dans les mêmes conditions –, la mesure recueillie est une bonne mesure, l'outil utilisé est un bon outil, le test réalisé est un bon test. Alors que le scientifique s'interrogera encore dix ans plus tard sur ce qu'il mesure exactement, l'entraîneur pourra se satisfaire de cette validité acquise par la répétition et le temps, sans avoir besoin de connaître les relations causales. Cette mesure pourra être très indicative de la performance (et il faudra alors le vérifier statistiquement) ou seulement classante, c'est-à-dire qu'elle permettra de reconnaître différents niveaux d'expertise. De toute façon, cela ne signifiera pas que l'on aura compris toute la chaîne qui existe entre ce que l'on mesure et la performance sportive.

**Christian MILLER** : Quels sont les tests de force musculaire couramment utilisés sur le terrain par les entraîneurs ? Pourquoi sont-ils réalisés et comment sont-ils exploités ?

**Michel PRADET** : Pour répondre partiellement à cette question, je préconiserai le geste sportif. Nous avons observé, avec Jacques Quièvre, que des athlètes qui ont la même force au développé-couché sur l'ergomètre Ariel, ont 20 kilogrammes de différence quand on utilise plus classiquement une barre d'haltérophilie. Sans nier l'intérêt de ces mesures, l'entraîneur est intéressé en priorité par les effets de la musculation. Sur le terrain, on bâtit un programme d'entraînement dans lequel, en fonction de ses analyses, de ses connaissances et de bien d'autres facteurs, on attribue un poids plus ou moins important à chacune des formes de travail (concentrique, excentrique, pliométrique, générale, spécifique, etc.), mais on n'arrive pas toujours à relier l'amélioration de la performance aux gains de force générés par ce programme. On s'oriente donc de plus en plus vers des tests spécifiques du geste de compétition et, à l'évaluation brute des indices maximaux, on ajoute le paramètre temps ou répétition : on considérera ainsi qu'il y a progression, même si l'indice maximum stagne ou régresse légèrement, simplement si la performance moyenne sur dix ou vingt répétitions du même geste a été améliorée.

**Alain LACHÈZE** : Une petite observation concernant les différences observées entre le développé-couché aux barres et à l'ergomètre Ariel... L'utilisation des appareils à charges guidées peut générer des déséquilibres par affaiblissement des muscles fixateurs. Des athlètes, très puissants sur ce genre d'appareil, sont incapables de produire sur le terrain des accélérations, des changements de rythme ou d'appui à la hauteur de leur potentiel. Il sera alors obligatoire d'utiliser des charges plus modérées et des barres à disque classiques pour rééquilibrer la musculature de soutien.

**Jacques DUCHATEAU** : Je ne suis pas non plus partisan des « machines » pour l'entraînement de la force en sport et je préfère de beaucoup les haltères classiques, même s'il faut adapter spécifiquement la gestuelle. En revanche, quand il s'agit de mesurer les effets de l'entraînement de la force, il est beaucoup plus intéressant de le faire au moyen de l'appareil le plus spécifique possible, car on évalue ainsi le transfert du gain de force dans le geste technique. C'est ce que nous faisons lorsque nous testons régulièrement les sprinters sur des startings-blocks équipés de jauges de contraintes qui permettent de mesurer, sur chaque block, la force et l'impulsion de la force.

**Claude MONOT** : Le décalage qui existe entre des performances de musculation réalisées à l'entraînement (exercices spécifiques compris) et la performance de compétition est assez étonnant. Je ferai deux observations :

- À une époque, des sauteurs en longueur français réalisaient des séances exceptionnelles de « pliométrie spécifique sur banc » et... sautaient moins loin.
- Quand les sautoirs à la perche ont été disponibles « à l'intérieur », le niveau technique des perchistes s'est considérablement amélioré.

En reliant ces deux observations, on comprend l'extrême nécessité de développer les facteurs physiques de la performance (force, vitesse, détente, etc.) en liaison permanente avec la technique. En décathlon, discipline complexe où il est difficile de qualifier la spécificité, le développement de la puissance d'une chaîne musculaire est associé en permanence à des gestes très techniques. Nous avons donc supprimé toutes les machines pour n'utiliser que les barres et faire des décathloniens des « athlètes complets », capables de s'adapter à toutes conditions et à tous les aléas d'une compétition qui dure deux jours. Nous conservons bien entendu les tests de musculation, plus comme repères habituels que pour en tirer des conclusions, car si la force est importante, c'est ce que le décathlonien est capable d'en faire sur le terrain qui est primordial.

**Régis MOLLARD** : La force est certes un bon indicateur, mais certainement pas le seul. Un gain de force n'est pas synonyme de gain de performance, car on ne connaît pas la contribution de la force dans l'efficacité d'un geste. Cela reste néanmoins un indice de référence, comme beaucoup d'autres, qu'il faut interpréter comme tel. Certains sports sont faciles à cerner et l'indice explicatif de la performance relativement simple à déterminer. En revanche, dans la majorité des cas, de nombreux autres indicateurs sont nécessaires pour cerner cette performance et on se heurte alors à la multiplicité des tests, que les athlètes, par expérience, apprécient rarement.

**Georges POUMARAT** : Bien que les points de vue exposés soient très proches les uns des autres, nous n'avons pas répondu à la question du « pourquoi » de la mesure. On peut mesurer la force pour détecter le talent, classer des athlètes ou suivre un entraînement : ce sont trois cas de figure qu'il faut considérer séparément. Si on parle de suivi – comme c'est le cas dans notre débat jusqu'à présent –, il faut effectivement utiliser les tests les plus proches de la spécialité. Mais nous n'avons pas abordé le cas de savoir si les gains de force que l'on mesure classiquement sont valables quand il s'agit de détection ou de classement. Allons plus loin : puisqu'il est admis que la meilleure mesure est celle qui est la plus proche du geste, quel modèle technique doit-on retenir : celui du plus haut niveau ou celui du niveau actuel de l'athlète ? Au saut en hauteur, l'apparition du fosbury a radicalement modifié l'approche classique du saut, de l'impulsion et de la course d'élan. Faut-il s'appuyer sur les modèles théoriques proposés par les athlètes experts pour bâtir des programmes d'entraînement ou tendre vers une individualisation poussée, en fonction des paramètres morphologiques, physiques et peut-être psychologiques ?

**Michel PRADET** : À propos des tests de terrain, je vous livre quelques observations que j'ai pu faire en préparant physiquement un groupe de judokas de très haut niveau. N'ayant en charge que l'aspect physique, j'ai été conduit à utiliser toutes sortes de tests hors tatamis pour assurer cette préparation. Il est clairement apparu que la représentativité de ceux-ci par rapport à la forme sportive était très individualisée. Fabien Canu a toujours obtenu des résultats fantastiques chaque fois qu'il battait son record de vélocité dans une course en sur-vitesse. Quand ses résultats au test ont été moins bons, les résultats au judo l'ont également été. Je ne nie pas l'effet pervers du système : il finissait par réclamer le test avant une compétition importante, test que – je m'empresse de le dire – nous avons trouvé par hasard et qui n'avait strictement aucune signification pour Stéphane Traineau, champion du monde lui aussi. Pour lui, il s'agissait d'une épreuve de puissance lactique en course et, pour Laurent Del Colombo, d'une série de « parcours enchaînés ». Ainsi, par expérience, il arrive que l'on puisse relier – avec un degré de certitude non négligeable, que je n'explique pas – les résultats d'une ou de quelques épreuves standardisées à ceux de la compétition. Par contre, il apparaît que la rigueur dans la tenue des carnets d'entraînement est de nature à favoriser la production de la performance : par essais et erreurs, on identifie avec le

sportif et pour lui-même des « enchaînements d'exercices » et des « enchaînements de séances » qui, chaque fois qu'ils sont reproduits, provoquent globalement des effets très positifs sur la performance spécifique. Ces adaptations sont-elles d'ordre physiologique, psychologique ou les deux à la fois ? Enfin, je me permets d'insister sur l'attitude que nous devons avoir sur le terrain quand apparaît une nouvelle méthode d'entraînement et, surtout, de musculation. Il s'agit plus de l'intégrer adroitement dans « ce qui marche déjà » que de l'utiliser quasi exclusivement parce qu'elle est censée provoquer des gains « fantastiques » – comme cela arrive souvent dans les phénomènes de mode.

**Alain LACHÈZE :** Je suis entièrement d'accord avec ce qui vient d'être dit mais j'insiste pour dire, et ce n'est pas incompatible, qu'il est indispensable, lors des tests d'évaluation de la force, de mesurer également d'autres paramètres, comme la vitesse d'exécution, l'endurance de la force, la mobilité de l'articulation, l'amplitude gestuelle, qui sont autant de facteurs participant à l'expression de la tonicité musculaire.

**Régis MOLLARD :** Tout ce que nous venons de dire montre la complexité que l'on rencontre pour le choix des tests de force. Aussi faut-il ramener le problème à des éléments simples : choisir des épreuves spécifiques à l'objectif, qui intègrent vitesse d'exécution, finesse du geste et force, dont on standardise la réalisation pour toutes les catégories et que l'on conserve longtemps. On crée ainsi, progressivement, un système de références qui peut constituer un excellent outil pour guider l'action d'entraînement. C'est la démarche de l'entraîneur, c'est notre démarche en réadaptation ou en prévention, c'est celle qui peut le mieux nous aider à faire le lien entre le terrain et les travaux de recherche sur la force musculaire.

**Jacques VAN HOECKE :** Je voudrais revenir sur cette ambivalence que l'on semble entretenir entre tests spécifiques et tests généraux. En termes de force, les structures physiologiques du muscle ont des propriétés bien connues, qui s'expriment dans la complexité d'un geste sportif. Elles se situent très en amont de celui-ci, les facteurs qui interfèrent sont multiples (recrutement, niveau d'activation, agonistes et antagonistes, la posture, etc.) et c'est le résultat de toutes ces interférences que l'on observe ou que l'on mesure à la périphérie. Finalement, ça ne devrait pas nous poser problème, si ce n'est que l'entraînement intervient à tous les niveaux de ces mécanismes d'adaptation. À chaque étape de la transformation de la propriété, l'entraînement transforme le système. Et c'est de là que vient mon interrogation, car s'il faut évidemment mesurer « le produit fini » par des tests hyper spécifiques, il faut se réserver la possibilité « d'aller voir » comment se comporte la propriété de base. Dans le domaine de l'énergétique, on explore le potentiel oxydatif de base de la cellule, tout en utilisant d'autres tests de terrain pour mesurer l'endurance spécifique du coureur de demi-fond, du nageur, du marathonien ou du skieur de fond. En ne le faisant pas dans le domaine de la force, on se prive de l'évaluation toujours indispensable de « ce qu'il est encore possible de faire ». Le problème du choix entre tests généraux et tests spécifiques est donc totalement obsolète. L'attitude la plus opérationnelle, pour l'entraîneur et le chercheur, c'est en fait de contribuer à un aller et retour permanent entre ces deux types de tests.

**Jacques DUCHATEAU :** Je souscris totalement à cette position. En revanche, je suis tout à fait opposé à l'utilisation exclusive de tests généraux pour mesurer la force.

**Christian MILLER :** Il est clair que les capacités musculaires spécifiques qui sont engagées dans la performance se développent suivant une certaine procédure, dans laquelle on observe que des priorités sont données, pendant des durées variées, à différentes formes de travail. On ne développe pas en permanence et toute l'année la force spécifique ; quand on s'en éloigne plus ou moins longuement pour développer d'autres capacités (parce qu'on sait qu'elles sont directement, ou indirectement, engagées dans l'activité, ou qu'elles constituent un déficit majeur pour l'athlète), la mesure de la force générale devient indispensable pour suivre, réguler et adapter les programmes d'entraînement.

**Michel PRADET** : Pour rebondir sur une observation pertinente faite au début de ce débat par Jacques Quièvre, l'entraîneur est très intéressé par l'évolution des indices de force en état de fatigue et très peu de procédures ont été validées pour ce type de mesure. Savoir à quel type de profil et de pourcentage du pic de force correspond l'installation d'un état de fatigue est aussi utile, sinon plus, que la connaissance d'un indice maximum.

**Serge LE BOZEC** : Évaluer l'état de fatigue à partir d'une diminution de la force de 10 à 20 % n'est à mon sens pas raisonnable. Par contre, au moyen d'analyses spectrales de l'EMG, on peut envisager de la quantifier sous certaines conditions.

**Jacques DUCHATEAU** : Bien que le problème soit complexe, je ne serais pas aussi catégorique. Certains estiment qu'il y a fatigue quand la force diminue, d'autres quand l'EMG se modifie. Or, cette modification intervient quasiment dès le début de la contraction, autrement dit : le muscle se fatiguerait alors qu'il n'a pas encore perdu sa force ! Tout dépend donc de la définition que l'on donne de la fatigue. Pour ma part, je suis partisan d'utiliser la mesure de la force pour qualifier un niveau de fatigue, car finalement cela correspond assez précisément aux sensations de l'athlète.

**Christian MILLER** : Nous venons d'évoquer assez largement les problèmes liés à la mesure de la force musculaire du sportif. Mais nous savons aussi que la force que nous essayons de développer et que nous tentons de mesurer n'a de valeur pour l'athlète qu'en tant qu'elle s'exprime spécifiquement.

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU** : Dans sa conférence, Jacques Duchateau nous a rappelé quelques-unes des expériences les plus significatives concernant la spécificité des gains en fonction du type de contraction, du mouvement, de l'angle, de l'engin, etc. L'expérience de Morehouse (1957), qui met en évidence des gains de force des fléchisseurs du coude quand on teste les sujets debout et l'absence de gain quand on les teste couchés, montre que la posture joue un rôle également important dans l'expression de la force. Mais les choses sont un peu moins claires quand il s'agit des conditions de la spécificité en fonction du mode de contraction isométrique ou anisométrique. En se référant à l'idée que le gain de force dépend du niveau de la surcharge, il faudrait, pour véritablement comparer les mérites respectifs de ces modes de contraction, pouvoir les quantifier l'un par rapport à l'autre et dire, par exemple, que « tel programme de musculation isométrique représente une surcharge supérieure (ou inférieure) à tel autre programme de type anisométrique ». Sait-on ou peut-on faire ce type de quantification ?

**Jacques DUCHATEAU** : Je ne suis pas certain que ce soit véritablement le problème ; et pour moi, l'objectif n'est pas de comparer l'efficacité respective des méthodes isométriques et anisométriques. Il s'agit plutôt de savoir si une force acquise dans un régime de contraction peut se transférer dans un autre régime. Les nombreuses études publiées sur cette question s'accordent toutes pour montrer qu'il y a peu de transfert. Et ceci est plus important à retenir que le mérite de telle ou telle méthode par rapport à une autre.

**Chantal THÉPAUT-MATHIEU** : Néanmoins, sur le plan méthodologique, le problème de la quantification de la surcharge lors de la comparaison des deux méthodes reste posé.

**Régis MOLLARD** : Il me semble que la seule solution consisterait à utiliser l'électrostimulation dans deux conditions, une isométrique et l'autre dynamique, pour lesquelles on impose la même fréquence et la même intensité de stimuli. Mais cette comparaison est-elle véritablement nécessaire ? En fonction du diagnostic et des objectifs, l'entraîneur choisit de faire de l'isométrie, de l'anisométrie ou les deux, parce qu'il est maintenant établi que les gains ne sont pas transférables d'un mode à l'autre.

**Jacques DUCHATEAU** : Je reconnais que ce problème peut avoir un intérêt scientifique mais, du point de vue de l'entraîneur qui a la charge d'un athlète, la comparaison en tant que telle ne m'apparaît pas très intéressante.

**Jacques QUIÈVRE :** À ce stade de notre débat, que faut-il attendre d'un « renforcement musculaire spécifique » qui serait différent de l'activité sportive elle-même ? Nous nous trouvons devant un véritable problème que nous rencontrons en permanence dans la salle de musculation. Quelle est la limite entre la pratique de compétition et ce que nous proposons à l'entraînement ?

**Jacques DUCHATEAU :** La procédure d'entraînement reconnue comme étant indiscutablement la meilleure est la compétition. Hélas, on ne peut pas faire que de la compétition car on « exploserait ». Il faut donc revenir en arrière, « décortiquer » – un peu, beaucoup ou énormément – l'activité pour développer isolément, deux à deux ou huit par huit, tous les facteurs de la performance qu'on a été capable d'identifier. La musculation répond à cette logique, ou plutôt à cette démarche. Le problème se pose alors de savoir dans quelle mesure on peut revenir en arrière, donc « faire des choses fausses pour espérer, ensuite, faire encore mieux les choses justes qu'il reste à faire ». C'est toute la technique, la démarche et le savoir-faire de l'entraîneur que de fixer des orientations et des priorités à certains moments de la préparation. C'est de cette manière que les étapes d'entraînement seront, suivant les besoins ou suivant la stratégie établie, plus générales, plus orientées ou plus spécifiques, et bien souvent mixtes.

**Christian MILLER :** A-t-on des critères pour dire qu'un entraînement est plus ou moins spécifique ?

**Jacques QUIÈVRE :** J'en proposerai trois : le *geste technique* et l'exercice sera spécifique s'il engage le même dialogue « posture-mouvement » que l'activité, la *puissance mécanique* développée et le *temps d'effort* qui doivent tous deux être extrêmement proches de l'activité. En s'écartant plus ou moins de ces critères, on génère une infinité de combinaisons, où l'on est très proche de la spécificité, par exemple pour une qualité physique, relativement éloigné pour une autre et franchement à l'opposé pour une troisième.

**Jacques DUCHATEAU :** Dans l'entraînement, il y a un temps pour tout ; pour l'augmentation de la masse (les charges seront alors plus lourdes, les répétitions plus longues et moins dynamiques que le geste technique), pour le développement d'une force orientée vers la spécialité (on utilisera des modes de contractions plus proches du geste, au moyen de charges moins élevées et plus dynamiques), pour la force spécifique à l'approche de la compétition. Mais il y a aussi un temps pour entretenir le niveau de la force acquise durant cette période capitale et l'athlète utilisera alors des charges lourdes et des exercices non spécifiques, etc. C'est en jouant adroitement sur la part respective de chaque forme de travail aux différents moments de la préparation que l'entraîneur peut résoudre cette problématique complexe du développement permanent de la force spécifique soutenue par un entraînement musculaire généralisé indispensable. Il est remarquable de souligner combien la terminologie des entraîneurs reflète cette problématique : entre les exercices généraux, qui s'écartent totalement de la spécialité, et les exercices spécifiques, ils ont identifié des exercices « orientés », qui ne remplissent pas les trois critères proposés par Jacques Quièvre, mais peut-être seulement un ou deux, et qui contribuent à la meilleure progression d'un entraînement général vers un entraînement spécifique.

**Jacques VAN HOECKE :** Nous nous trouvons là au cœur du concept de spécificité et, à ce niveau, tout dépend du système de référence que l'on adopte, autrement dit de ce que l'on veut « copier ». Si c'est le geste technique, on modulera différents paramètres pour obtenir des déplacements, des angles, des charges et des vitesses d'exécution qui tendent à le reproduire. Il s'agit de copier l'image et, quand on se muscle dans la spécialité grâce à des charges additionnelles adaptées, on en retire le sentiment d'une spécificité maximale. Je crois qu'il y a une autre forme de « copie », celle que Jacques Duchateau a évoquée ce matin, la « copie des mécanismes engagés » dans le geste technique de compétition : concentrique, excentrique, concentrique précédé d'excentrique, concentrique précédé de statique, etc. Quand l'exercice choisi engage le mécanisme musculaire mis en jeu par la spécialité, j'ai tendance à dire qu'il s'agit d'une bonne spécificité, même si le geste est éloigné de l'image de référence. C'est ce qui se

passé avec l'exemple du chariot de musculation, dont la gestuelle est très spécifique de la natation, mais dont on peut se demander si le mécanisme musculaire mis en jeu l'est tout autant.

**Jacques DUCHATEAU** : Je suis tout à fait d'accord avec cette approche et j'ajouterai qu'il faut aussi veiller, au plan de la spécificité et en toute occasion, à l'activation initiale du mouvement. Parfois, la charge limite la vitesse d'exécution et elle ne saurait empêcher la bonne impulsion du mouvement.

**Christian MILLER** : Jacques Van Hoecke vient de souligner la nécessité de prendre en compte les mécanismes musculaires pour définir la spécificité. Mais je ne serai pas aussi abrupt que lui, car ce ne peut être le seul critère : la mise en jeu du cycle étirement-détente, qui caractérise spécifiquement le sauteur en hauteur, ne suffit pas à caractériser un exercice spécifique de musculation du sauteur. Il est certes difficile de dissocier les critères qui qualifient un exercice « spécifique » ; néanmoins, aux trois critères déjà rappelés par Jacques Quièvre, geste technique ou posture-mouvement, puissance développée – donc indirectement charge additionnelle – et temps d'effort, il faut ajouter le type de mécanisme engagé, c'est-à-dire le type de contraction musculaire.

## LISTE DES INTERVENANTS

### L'auteur :

**Jacques Duchateau** est professeur à l'université libre de Bruxelles. Ancien athlète, lanceur du javelot de niveau international et entraîneur d'athlétisme, il est également cadre de la Fédération francophone belge d'athlétisme et responsable de la cellule scientifique.

### **Alain LACHÈZE**

Groupe Musculation  
École interarmées des sports (Fontainebleau)

### **Serge LE BOZEC**

Laboratoire de la motricité  
CNRS UA 385  
CHU Pitié-Salpêtrière (Paris)

### **Christian MILLER**

Unité de renforcement musculaire  
INSEP (Paris)

### **Régis MOLLARD**

Département médical  
INSEP (Paris)  
UFR biomédicale des Saints-Pères  
CNRS UAR 220

### **Claude MONOT**

Entraîneur national des épreuves combinées  
Fédération française d'athlétisme (Paris)

### **Georges POUMARAT**

Groupe biomécanique et instrumentation  
UFR STAPS  
Université de Clermont-Ferrand

### **Michel PRADET**

Département de la formation  
INSEP (Paris)

### **Jacques QUIÈVRE**

Unité de renforcement musculaire  
INSEP (Paris)

### **Chantal THÉPAUT-MATHIEU**

Laboratoire de biomécanique et de physiologie  
INSEP (Paris)

### **Jacques VAN HOECKE**

Groupe Analyse du mouvement  
UFR STAPS  
Université de Bourgogne (Dijon)