

# LES MECANISMES DE LA FORCE:

**Gilles Cometti,**

Centre d'Expertise de la performance,  
UFR STAPS Dijon.

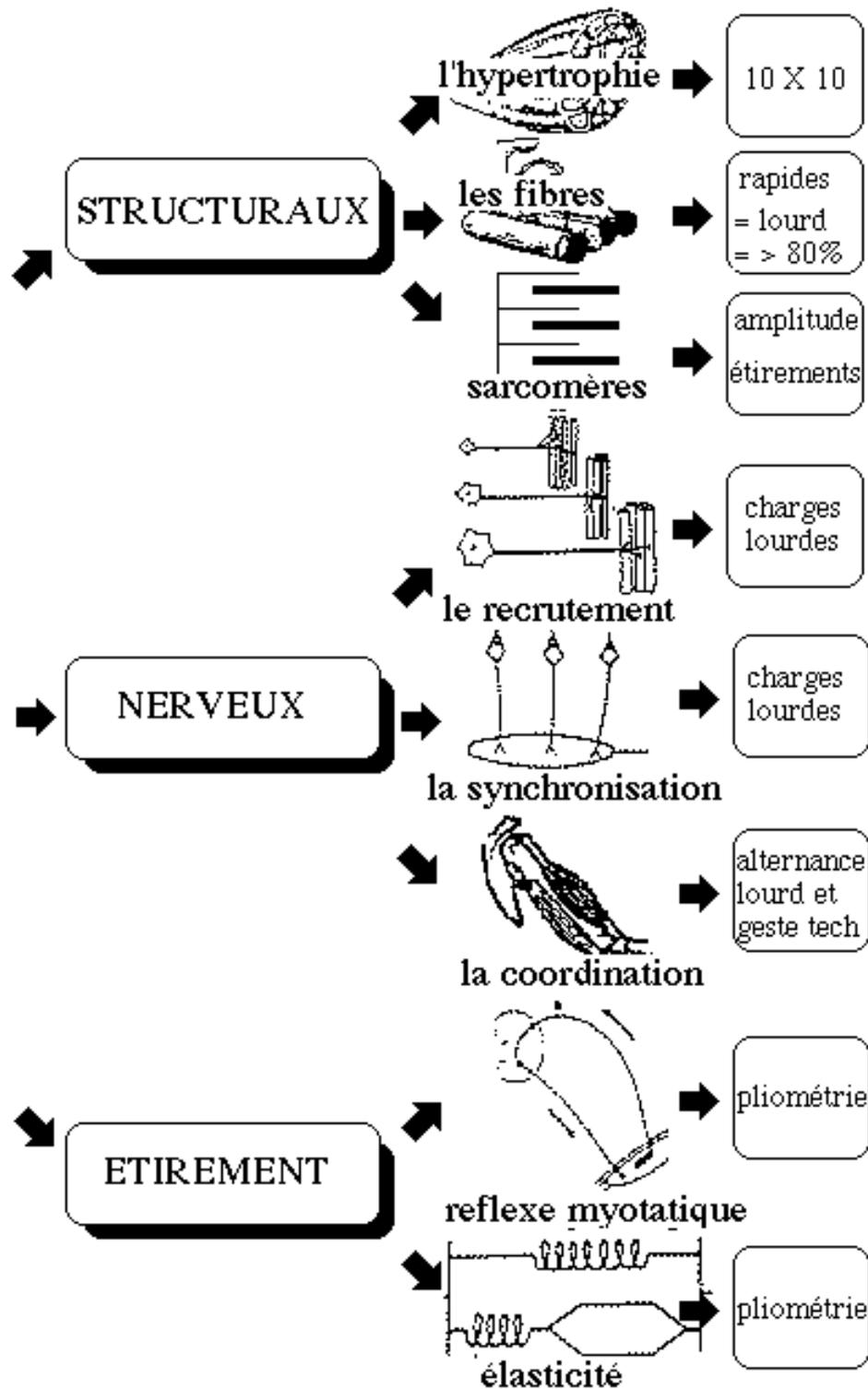


figure 1 : les mécanismes de la force

## D) LES MECANISMES DE LA FORCE :

La possibilité pour un athlète de développer une force importante dépend de différents facteurs qui sont schématisés sur la figure 1. Ils sont de trois ordres :

- structuraux : touchant à la composition même du muscle
- nerveux : concernant l'utilisation des unités motrices
- en rapport avec l'étirement : lequel potentialise la contraction.

Nous allons les aborder les uns après les autres en énonçant les connaissances essentielles et surtout en tirant pour chaque paramètre les conséquences pratiques.

### 1) LES FACTEURS STRUCTURAUX :

#### 1.1) L'HYPERTROPHIE :

##### 1.1.1) Données physiologiques :

L'hypertrophie s'explique par 4 causes principales que l'on trouve sur la figure 2 :

- une augmentation des myofibrilles,
- un développement des enveloppes musculaires (tissu conjonctif),
- une augmentation de la vascularisation
- une augmentation du nombre de fibres, argument qui est encore discuté aujourd'hui chez l'homme.

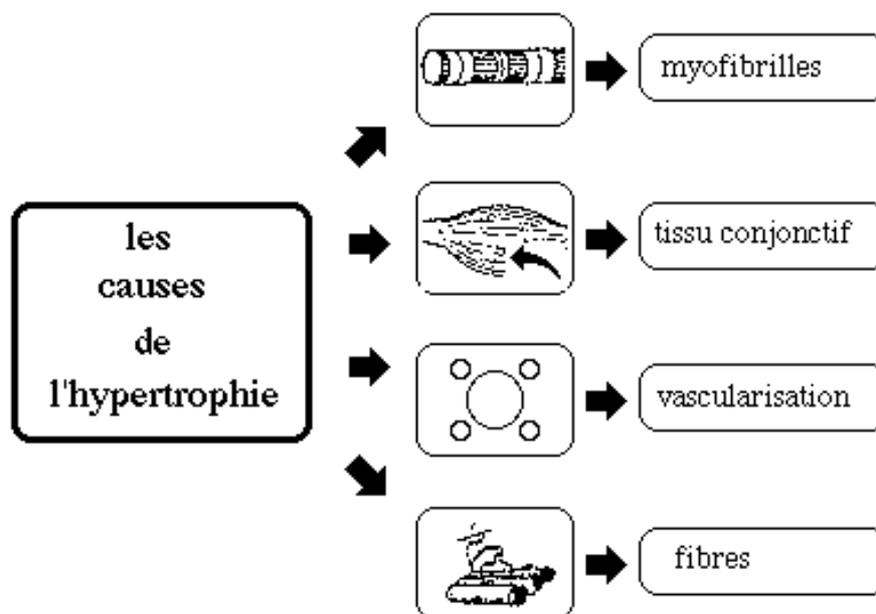


figure 2 : les causes de l'hypertrophie

C'est le phénomène de "surcompensation" qui illustre le déroulement temporel du processus. (fig. 3)



figure 3 : le phénomène de surcompensation et sa gestion dans le temps.

### 1.1.2.) Conséquences pratiques :

La figure 4a montre l'influence du nombre de répétitions maximum sur le développement de la masse musculaire. On constate que c'est avec 10 RM que l'on obtient le meilleur développement de la masse musculaire.

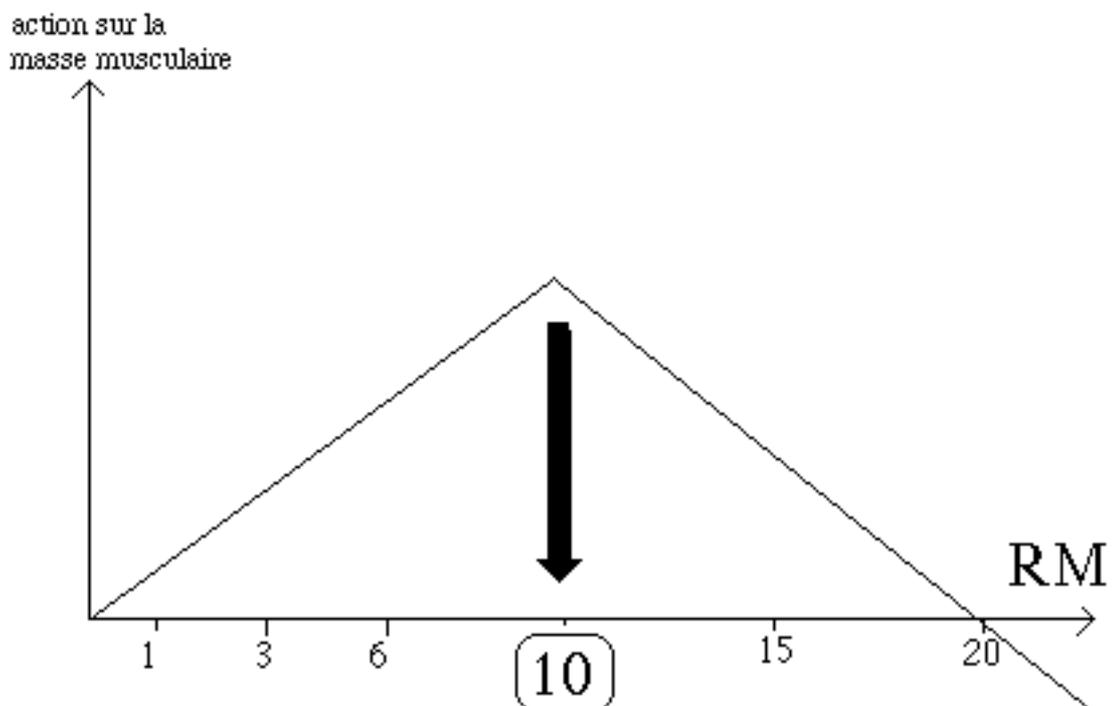


figure 4a : influence du nombre de répétitions maximum sur le développement de la masse musculaire.

L'hypertrophie s'obtient par le 10X10 : 10 séries de 10 répétitions avec une charge que l'on ne peut soulever que 10 fois (10 RM).

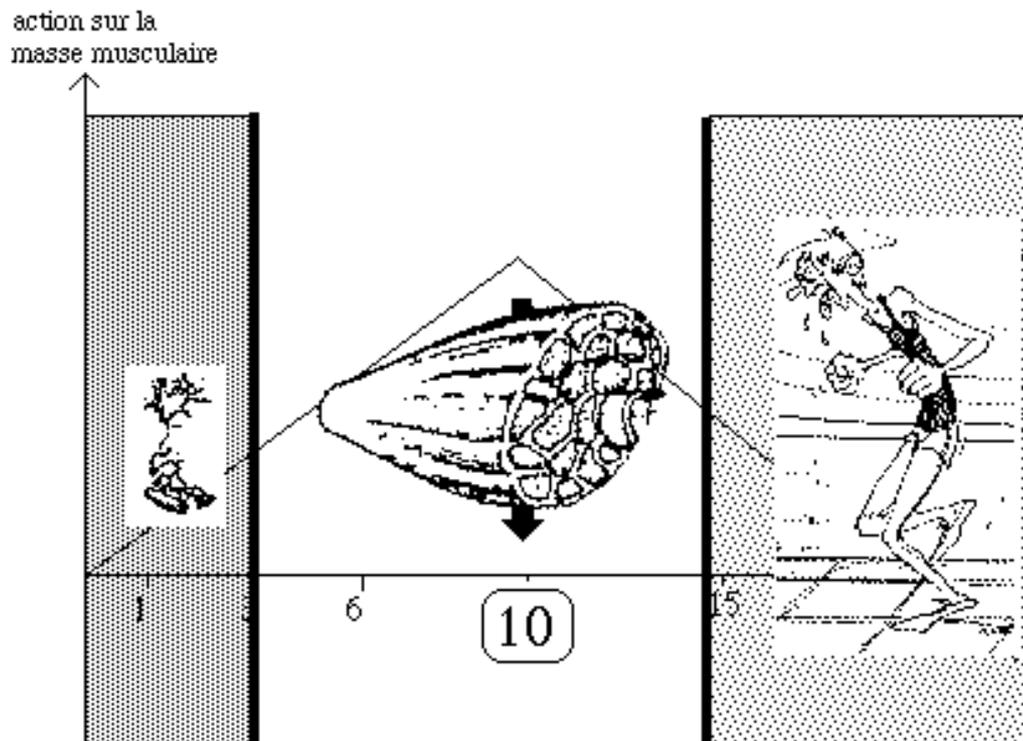


figure 4b : influence du nombre de RM sur les facteurs de la force.

La figure 4 b distingue 3 zones :

- de 1 à 3 RM l'amélioration de la force est due principalement aux facteurs nerveux
- la zone de 3 à 12 RM concerne la force accompagnée de masse musculaire (avec un maximum à 10 RM)
- au delà de 15 RM il ne s'agit plus de travail de force mais les facteurs énergétiques deviennent prépondérants.

## **1.2.) LES FIBRES MUSCULAIRES :**

### **1.2.1) Données physiologiques :**

Il existe 2 types de fibres répertoriées dans le muscle :

- les fibres lentes ou de type I
- les fibres rapides ou de type II qui comprennent :
  - des fibres II a qui sont mixtes à métabolisme anaérobie et aérobie.

- des fibres II b qui sont rapides par excellence car à métabolisme anaérobie uniquement.

La figure 5 représente les différentes caractéristiques des fibres musculaires.

<b>fibres</b>	<b>taille</b>	<b>force</b>	<b>résistance à la fatigue</b>
<b>LENTES</b> ou I		 faible	 importante
<b>RAPIDES</b> ou II		 moyenne	 moyenne
<b>IIb</b>		 importante	 faible

figure 5 : tableau des caractéristiques des fibres musculaires.

Leur transformation s'explique par le schéma d'Howald qui montre combien la transformation est difficile dans le sens "lent" vers "rapide".

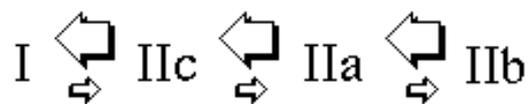


figure 6 : schéma de transformation des fibres selon Howald.

La différenciation des fibres se fait surtout au niveau de la myosine. Ainsi Howald distingue-t-il en fonction des fibres la présence de myosine lente et de myosine rapide qui se répartissent en fonction des fibres comme l'indique la figure 7.

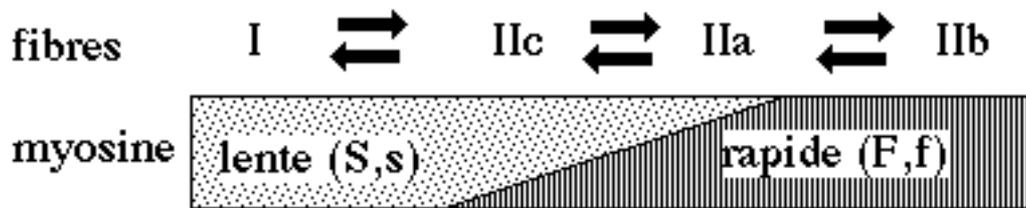


figure 7 : différents types de myosine en fonction des fibres (d'après Howald 1989)

### 1.2.2.) Conséquences pratiques :

Dans l'espoir d'obtenir une transformation des fibres de type I en fibres de type II, il faut créer dans le muscle des tensions importantes, la solution idéale consistant à travailler avec des charges lourdes.

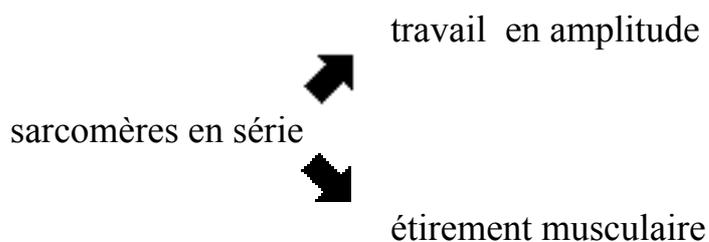
## 1.3) L'AUGMENTATION DES SARCOMERES EN SERIE :

### 1.3.1) Données fondamentales:

Depuis Tardieu et Tardieu (1972) et avec Golspink (1985) on sait qu'un muscle sous immobilisation voit ses sarcomères se multiplier en série si il se trouve dans une position d'allongement. Le travail musculaire en amplitude (c'est-à-dire le fait de solliciter le muscle en prenant garde de lui permettre de s'allonger complètement) est donc susceptible d'augmenter le nombre de sarcomères en série, même si rien n'est encore prouvé dans ce domaine. Inversement un muscle qui travaillerait trop sur de faibles amplitudes (et proche de la position de raccourcissement maximum) risquerait de voir son nombre de sarcomères diminuer et ainsi son efficacité diminuer.

### 1.3.2.) Conséquences pratiques :

Pour espérer un éventuel développement des sarcomères en série il est donc conseillé :



## 2) LES FACTEURS NERVEUX :

### 2.1.) LE RECRUTEMENT DES FIBRES :

#### 2.1.1.) Données physiologiques :

Le recrutement des fibres musculaires est expliqué classiquement par la loi d'Henneman ou "size principle", qui montre comment les fibres lentes sont recrutées avant les fibres rapides quelque soit le type de mouvement. Il y a donc dans ce cas un passage obligé par les fibres lentes ce qui n'est pas intéressant dans le cas de mouvements explosifs. La représentation de Costill (1980) est édifiante à ce sujet (fig.8). Une charge légère entraîne un recrutement des fibres lentes (I). Une charge moyenne entraîne le recrutement des fibres lentes et de II a. Une charge lourde entraîne le recrutement des fibres lentes, des II a et des II b.

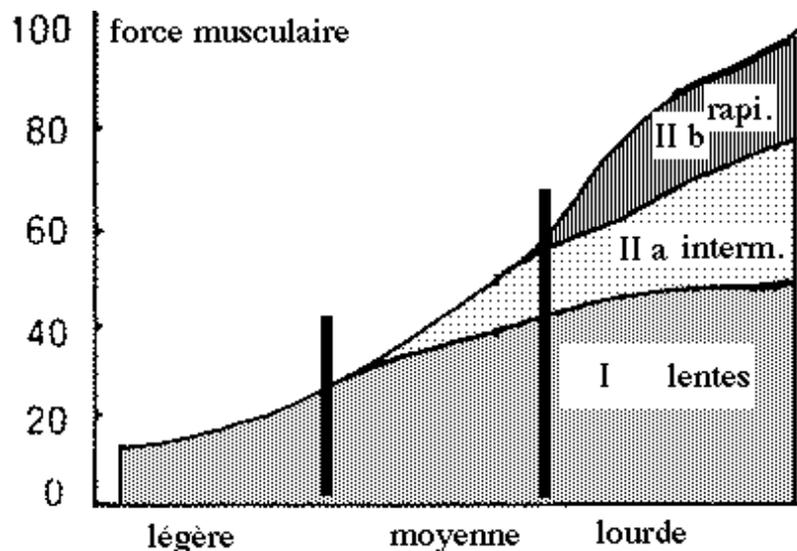


figure 8 : le recrutement des fibres en fonction de l'intensité de la charge (Costill 1980).

Aujourd'hui les avis sont partagés quand il s'agit de mouvements rapides de type "balistique" : la loi d'Henneman serait prise en défaut et les unités motrices de types II pourraient être recrutées directement sans solliciter les unités motrices lentes. (Grimby et Hannertz 1977) Toutefois certains (Desmedt et Godaux 1980) pensent que même dans les mouvements rapides le principe de la taille est respecté. Il semblerait que la loi d'Henneman soit valable pour des muscles ayant plusieurs fonctions possibles, uniquement dans leur fonction première.

### 2.1.2.) Conséquences pratiques :

Le recrutement des unités motrices intervient en début de travail de musculation expliquant ainsi les progrès rapides. Le schéma de Fukunaga (1976) traduit les rapports entre phénomènes nerveux et hypertrophie. (fig. 9)

- figure 9 (I). Situation de départ: le débutant ne recrute que peu de fibres (points noirs)
- figure 9 (II). Au bout de quelques semaines, le nombre d'unités motrices recrutées augmente, sans hypertrophie.
- figure 9 (III). Dans la suite de l'entraînement c'est surtout l'hypertrophie qui est la cause principale du gain de force.

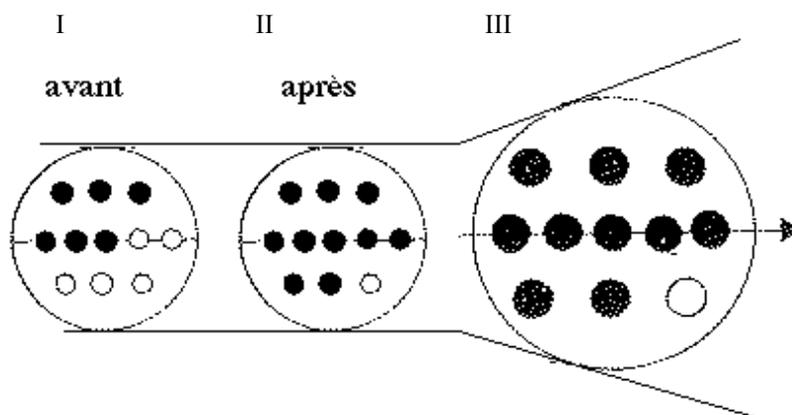


figure 9 : place des phénomènes de recrutement dans l'augmentation de force (d'après Fukunaga 1976)

## 2.2.) LA SYNCHRONISATION DES UNITES MOTRICES :

### 2.2.1) Données physiologiques :

Pour utiliser son muscle efficacement il faut le faire fonctionner en synchronisant les fibres. Comment s'explique ce mécanisme ?

Prenons l'exemple d'un groupe de personnes à qui l'on demande de crier un son toutes en même temps : au début les sons sont décalés dans le temps ; avec de l'entraînement les individus arrivent à synchroniser leurs voix. Les unités motrices fonctionnent de la même manière. L'explication physiologique la plus probable est la suivante : (fig. 10)

Les unités motrices sont au départ naturellement synchronisées (fig. 10 a). Le circuit de Renshaw est l'agent de la désynchronisation par des actions inhibitrices sur les motoneurones (fig. 10 b). L'entraînement de force par la mise en place d'inhibitions centrales sur le circuit de Renshaw permet à l'individu de retrouver la synchronisation initiale (fig. 10 c). Le stress est un facteur important pour parvenir à

ce résultat. Les sauts en contrebas sont à cet effet exemplaires et particulièrement efficaces. Le gain de force grâce à la pliométrie renvoie donc à une meilleure coordination intra-musculaire grâce à une levée d'inhibition. Selon Sale (1988) la synchronisation des UM ne permettrait pas une augmentation de la force maximum mais une amélioration de l'aptitude à développer beaucoup de force dans un temps très court.

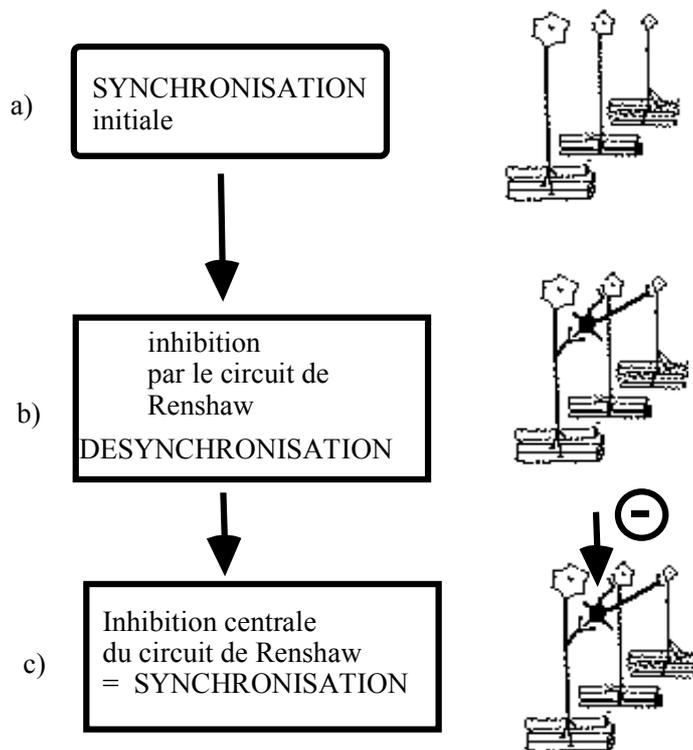


figure 10 : la synchronisation des unités motrices

### 2.2.2.) Conséquences pratiques:

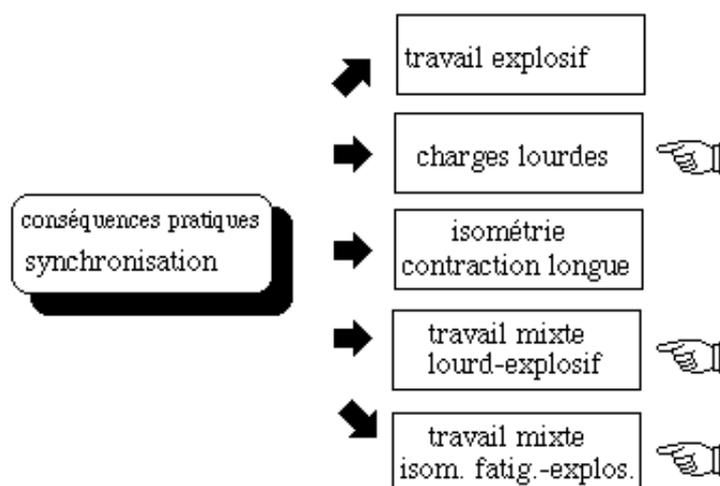


figure 11 : les moyens pour améliorer la synchronisation (Cometti, 1989).

La figure 11 montre les différents moyens pour parvenir à développer ce processus. On constate que les moyens les plus efficaces résident dans les charges lourdes (Zatsiorski, 1966), et le travail combinant exercices lourds et exercices explosifs.

### **2.3.) LA COORDINATION INTERMUSCULAIRE :**

#### **2.3.1) Données physiologiques :**

De nombreuses études montrent la spécificité de l'amélioration de la force. En effet un progrès en squat ne s'accompagne pas toujours d'un progrès en force du quadriceps testé sur une machine analytique. Ceci montre que le gain de force est dû en partie à des coordinations intermusculaires qui sont spécifiques des mouvements employés pour améliorer la force.

#### **2.3.2.) Conséquences pratiques :**

L'entraînement de force devra être combiné avec des exercices se rapprochant de la technique spécifique de la discipline: ainsi il est de plus en plus fréquent pour des sauteurs de coupler le travail de squat avec des bondissements.

### **3) L'IMPORTANCE DE L'ETIREMENT :**

Un muscle étiré produit une force supérieure, les explications sont aujourd'hui de 2 sortes :

- l'intervention du réflexe myotatique
- le rôle joué par l'élasticité série

### **3.1.) LE REFLEXE MYOTATIQUE :**

#### **3.1.1.) Données physiologiques :**

Il est mis en évidence par Schmidtbleicher (1985a) (fig. 12) sur un saut en contrebas.

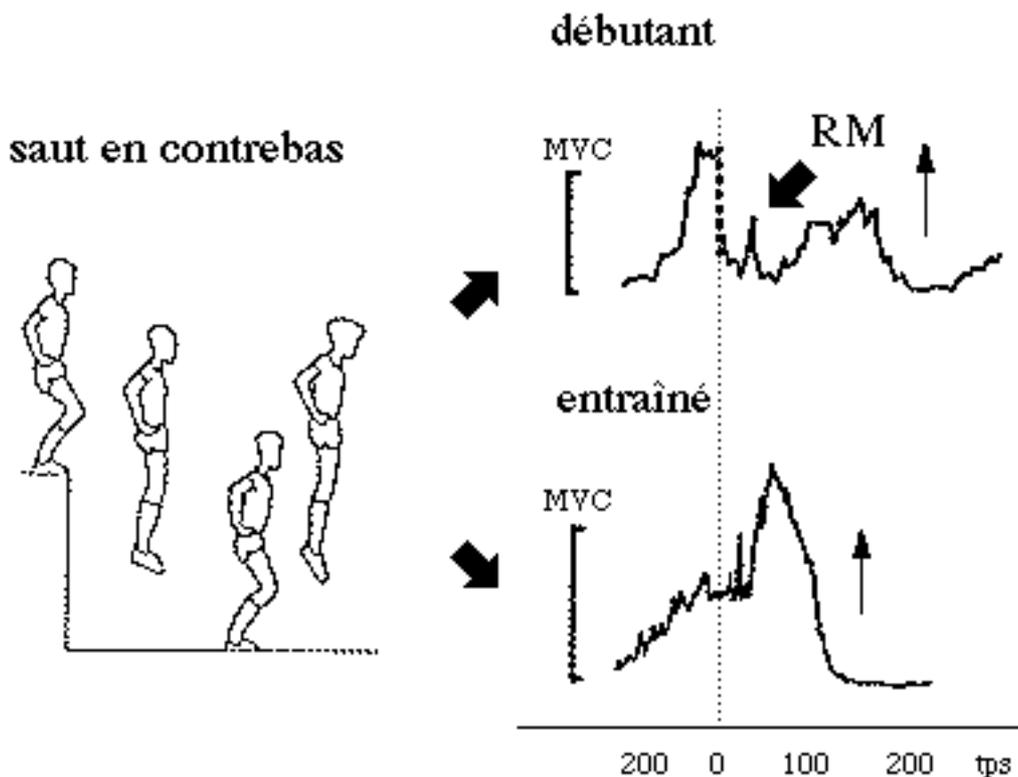


figure 12 : l'activité électrique du triceps lors d'un saut en contrebas de 1,10m.

Le tracé représente l'activité électrique du muscle (la sollicitation nerveuse du muscle). MVC représente la sollicitation musculaire obtenue chez l'athlète lors d'une Contraction Maximale Volontaire. L'axe des abscisses représente le temps en millisecondes. Les tirets verticaux indiquent le moment du contact de l'athlète avec le sol. On constate :

- les 2 athlètes obtiennent une sollicitation musculaire supérieure à leur MVC.
- le débutant exerce son effort maximum avant le contact avec le sol : on observe ainsi l'action du réflexe myotatique seul (R.M).
- l'athlète entraîné obtient une action du R.M. qui se fond dans son action volontaire.

### 3.1.2) Conséquences pratiques :

Le travail de pliométrie est particulièrement efficace pour améliorer cet aspect. Soulignons simplement la tendance actuelle qui consiste à varier l'angle de flexion au moment du contact avec le sol: au lieu d'arriver jambes tendues, on demande à l'athlète d'arriver avec une flexion du genou de 90° (fig. 13). On obtient ainsi un étirement dans une position inhabituelle et une efficacité à l'entraînement supérieure.



figure 13 : saut en contrebas avec flexion à 90° (d'après Bosco 1985).

### 3.2.) L'ELASTICITE MUSCULAIRE :

#### 3.2.1) Données physiologiques :

Elle est illustrée par le schéma de Hill (fig. 14) amélioré par Shorten. (1987)

On sait aujourd'hui que seule l'élasticité série (E.S.) est efficace dans les mouvements sportifs. On distingue dans cette E.S. deux fractions :

- une fraction passive qui se trouve dans les tendons
- une fraction active qui se trouve dans la partie contractile et même plus précisément dans les ponts d'actine-myosine comme le montre la figure 15.

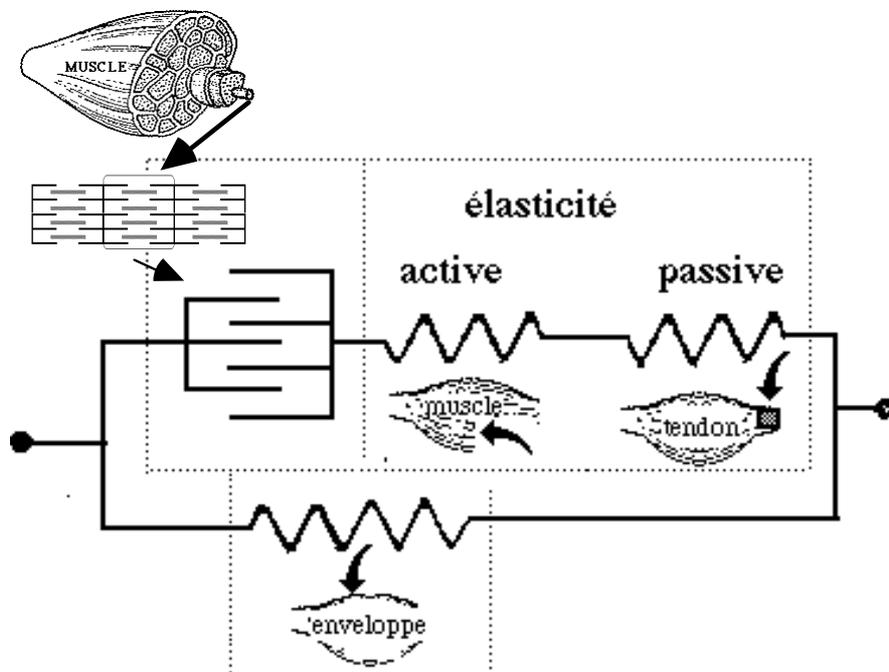


figure 14 : le schéma de Hill (modifié par Shorten, 1987)

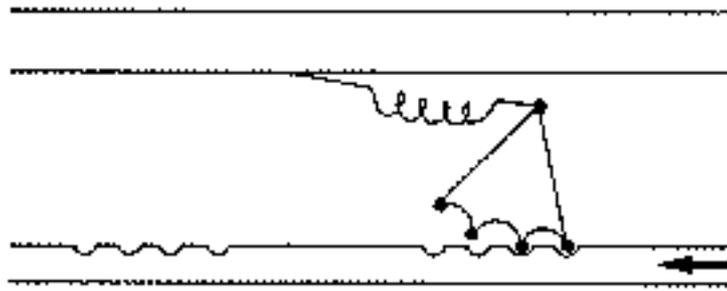


figure 15 : représentation des ponts d'actine-myosine (d'après Huxley 1974).

### 3.2.2.) Conséquences pratiques:

On cherche aujourd'hui à évaluer sur le terrain les qualités d'élasticité des athlètes, pour cela on utilise des tests qui ont été introduits par Bosco dans le domaine de l'entraînement. Les deux plus simples sont le Squat Jump (SJ) et le Counter Mouvement Jump (CMJ). Ils sont effectués avec le dispositif d'Abalakov.

La différence CMJ-SJ rend compte d'une qualité d'élasticité musculaire du sujet.

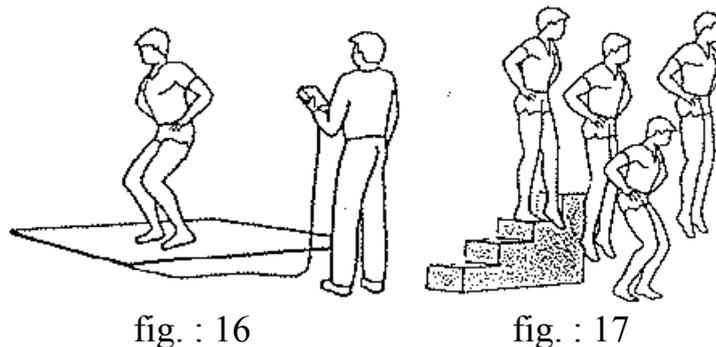


fig. : 16

fig. : 17

figure 16 et 17 : 16 -l'ergojump de Bosco 17 - le drop jump

Les deux tests les plus pertinents sont plus compliqués à mettre en oeuvre puisqu'ils nécessitent l'utilisation d'un tapis de contact relié à un chronomètre que Bosco a appelé Ergojump (fig.16) Ces 2 tests sont le drop Jump et le test de puissance de 15 secondes.

Le drop Jump consiste à effectuer des sauts en contrebas de différentes hauteurs (20, 40, 60, 80 et 100 cm).

Le test de puissance consiste à rebondir pendant 15 s le plus haut possible sur l'ergojump, le chronomètre calculant automatiquement la puissance développée.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adam K. und Vercoshanski Y. V. (1976) *Modernes Krafttraining in Sport*, Berlin: Bartels und Wernitz.
- Bosco C. (1985) L'effetto del pre-stiramento sul comportamento del muscolo scheletrico e considerazioni fisiologiche sulla forza esplosiva. In *Atleticastudi* jan-fev . 7-117
- Bosco C. (1985) *Elasticita moscolare e forza esplosiva nelle attivita fisico-sportive*, Roma: sociéta stampa sportiva.
- Cerretelli, P and Di Prampero, P. E. (1985) *Sport, ambiente e limite umane*, Milano: ed. Mondadori.
- Cometti G., (1988) *La pliométrie*, UFR STAPS, université de Bourgogne, BP 138, 21004, Dijon cedex
- Cometti G., (1989) *les méthodes modernes de musculation, tome 1, données théoriques*, 350 p, UFR STAPS, université de Bourgogne, Dijon.
- Cometti G., (1990) *les méthodes modernes de musculation, tome 2, données pratiques*, 300 p, UFR STAPS, université de Bourgogne, Dijon.
- Duchateau J. (1981) *Contribution à l'étude des mécanismes physiologiques des effets de l'entraînement sur la contraction musculaire*. Thèse de doctorat en éducation physique. Université libre de Bruxelles, 210 p
- Duchateau J. (1984) Isométric or dynamic training: differential effects on mechanical properties of a human muscle, *Journal of applied physiology*, 56, (2), 296-301.
- Fox E.L. and Matthews D.K. (1984) *Bases physiologiques de l'entraînement*, Paris: Vigot.
- Friden J., (1984) Muscle soreness after exercise; implication of morphological changes, *Int. J. Sports Medecine*, 5, 57-58.
- Friden J., Kjorell U., Thornell L. E., (1984) Delayed muscle soreness and Cytoskeletal altérations: an immunocytological stucky in man. *Int. J. Sports Medecine*, 5, 15-18.
- Gambetta V. (1987) *Les principes de l'entraînement pliométrique*, In traduction Insep n° 579. (edited by Insep)
- Gerbeaux, M. (1984) *Développement musculaire et croissance chez l'enfant et l'adolescent*. Thèse de 3e cycle de l'université de Lille.
- Goubel F. Van Hoecke J. (1982) *Biomécanique et geste sportif*, In *Cinésiologie XXI*, 41-51.
- Hakkinen, K. and Komi, P. V. (1981) Effect of différent combined concentric and eccentric muscle work regimens on maximal strenth development. In *Journal of Human Movement Studies*, 7, 33-34.
- Harre D. (1976) *Trainingslehre*. Berlin: Sportverlag.
- Hauptmann, M. and Harre, D. (1985) *Training zur Ausbildung der Maximalkraftfähigkeit*. In *Théorie und Praxis der Körperkultur*, n°9, 698-706.

- Helal, H. and Pousson M. (1986) La force. In memento de l'éducateur sportif, 2e degré. Insep publication, 143-160
- Johnson B. L. (1972) Eccentric vs concentric muscle training for strength development, *Medicine and science in sport*, 4, 2, 111-115.
- Kousneytsov, V,V, (1980) *Musculation à l'usage des sportifs de haute qualification*. Moscou: ed Fyzkoulтура y sport.
- Letzelter H. (1983) *Ziele, Methode und Inhalte des Krafttraining*, Hamburg, Verlag Ingrid Czwalina.
- Lundin P. (1985) Revue de l'entraînement pliométrique, In traduction Insep n° 558. (edited by Insep)
- Lyleire, J.C. (1985) *es cinétiques de récupération des propriétés contractiles du muscle humain après fatigue de musculation*. Thèse de troisième cycle, université de Lille.
- Marini J. F. (1981) *Contribution à l'étude des incidences de deux formes d'entraînement sur les caractéristiques histochimiques et mécaniques du muscle strié squelettique*. D.E.A. université de technologie de Compiègne.
- Pletnev, B. (1975) The effectiveness of different regimens of muscle work with equivalent loads. *Theory and practice of Physical Culture*, 10, 20-23
- Pletnev, B. (1976) The dynamics of muscle strength using different combined work with equivalent loads. *Theory and practice of Physical Culture*, 9, 19-22
- Poulain P. (1985) *Modifications des propriétés mécaniques du muscle humain après entraînement de la force*, Thèse de 3e cycle, université de Lille.
- Schmidtbleicher D. (1985) *Classification des méthodes d'entraînement en musculation*. In traduction Insep n°498. (edited by Insep)
- Schmidtbleicher D. (1985) *L'entraînement de force; 1ere partie : classification des méthodes*. Sciences du sport, août 1985.
- Schmidtbleicher D. (1985) *L'entraînement de force ; 2ème partie : l'analyse structurelle de la force motrice et de son application à l'entraînement*. Sciences du sport, septembre 1985
- Thépaut-Mathieu C. (1984) *Modification de la force musculaire et de l'activité des motoneurones au cours d'un entraînement isométrique chez l'homme*. Thèse de doctorat de 3 e cycle, université P. et M. Curie, Paris 6. 87 p
- Thys H. (1975) Effet de l'amplitude du mouvement sur le rôle joué par l'élasticité musculaire dans l'exercice, In revue *éducation physique*, XV, 3.
- Tschienne P. (1986) *Modifications dans la structure du cycle annuel d'entraînement*. In traduction Insep n°547. (edited by Insep)
- Viitassalo L.T. Bosco C. (1982) Electromechanical behaviour of human muscles in vertical jump, In *European Journal of Applied physiology*, 48, 253.
- Vercoshanski J .V. (1985) *Modèle d'organisation de la charge d'entraînement au cours du cycle annuel*, In traduction Insep n°472.(edited by Insep)
- Vercoshanski J .V. (1987) *La programmazione e l'organizzazione del processo di allenamento*. Società stampa sportiva, Roma.
- Vercoshanski J .V. (1982) *Le basi d'ell'allenamento della forza speciale nello sport*, Moscou.

Volkov, V.M. (1977) Processus de récupération en sport, Moscou: F.I.S.  
Weineck, J. (1983) Manuel d'entraînement, Paris: Vigot.  
Zatsiorski V. M. (1966) Les qualités physiques du sportif, In traduction Insep.