

LES MECANISMES DE LA FORCE :

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

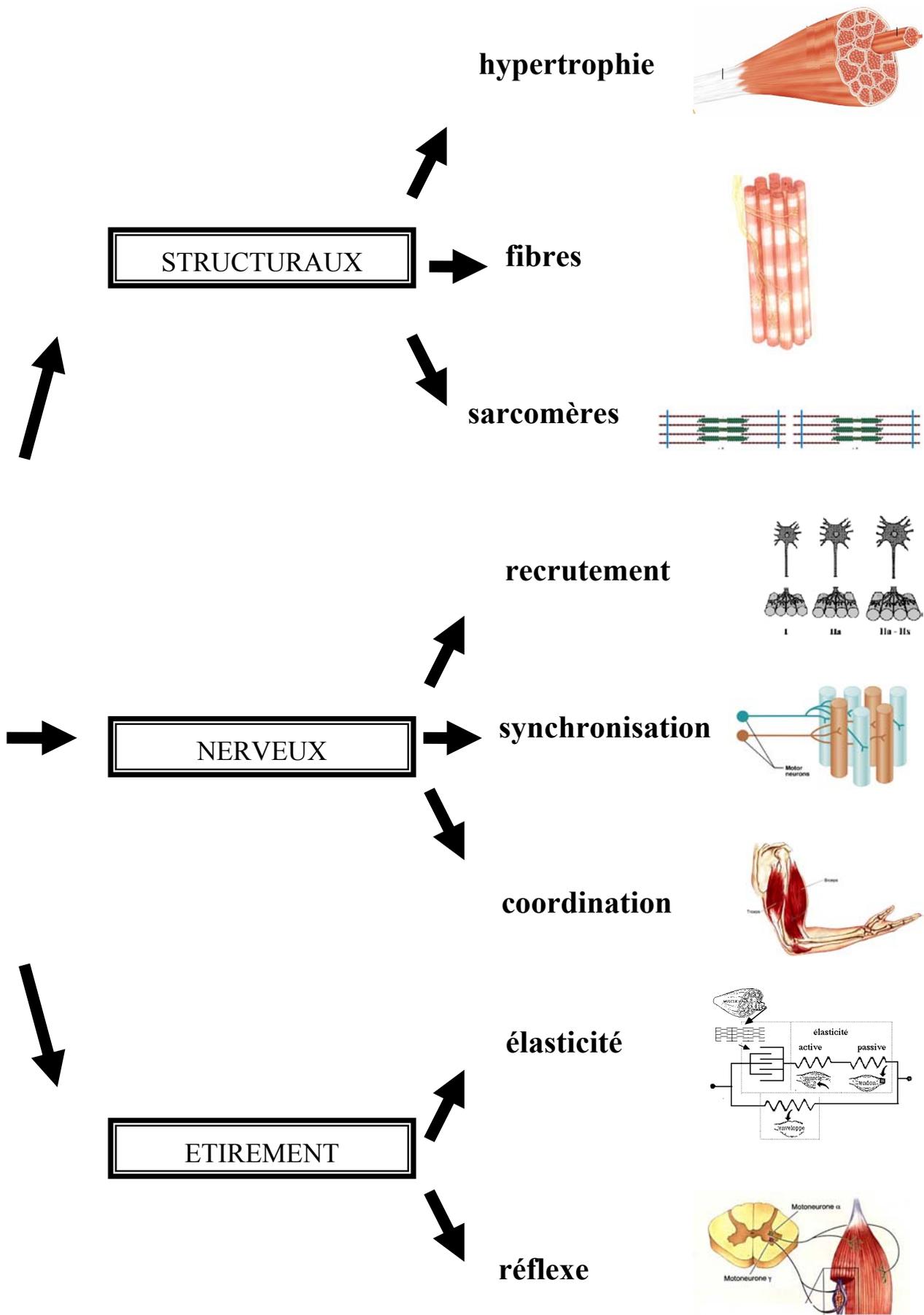


figure 1 : les mécanismes de la force

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.

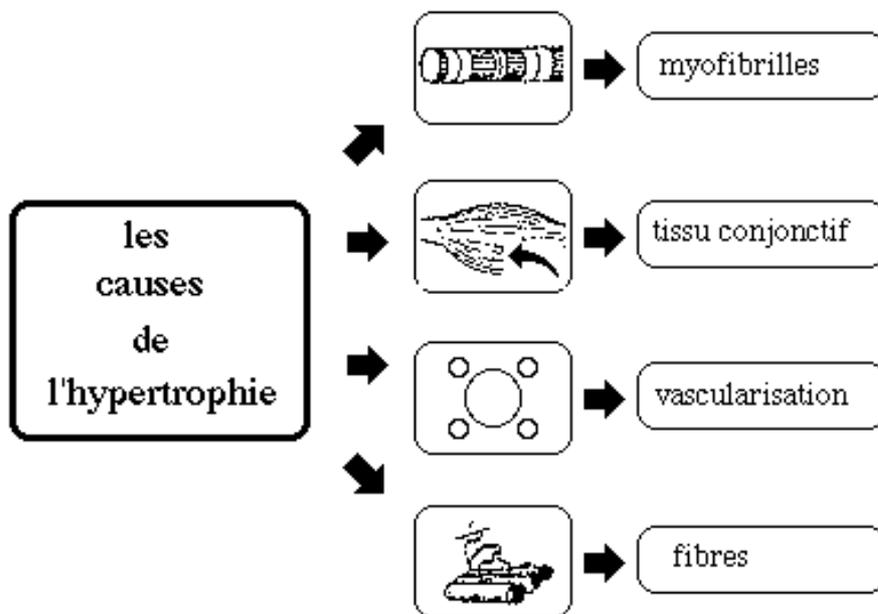


figure 2: les causes de l'hypertrophie

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

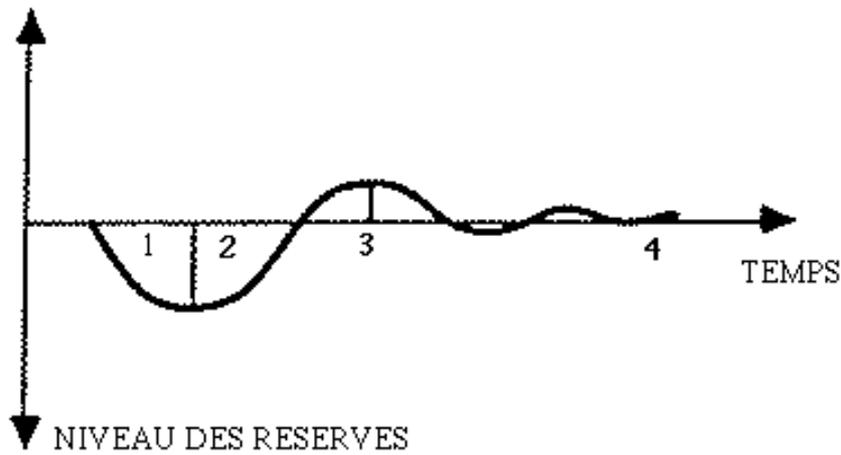


figure 3 : le phénomène de surcompensation et sa gestion dans le temps

1.1.2.) Conséquences pratiques :

La figure 4 a 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

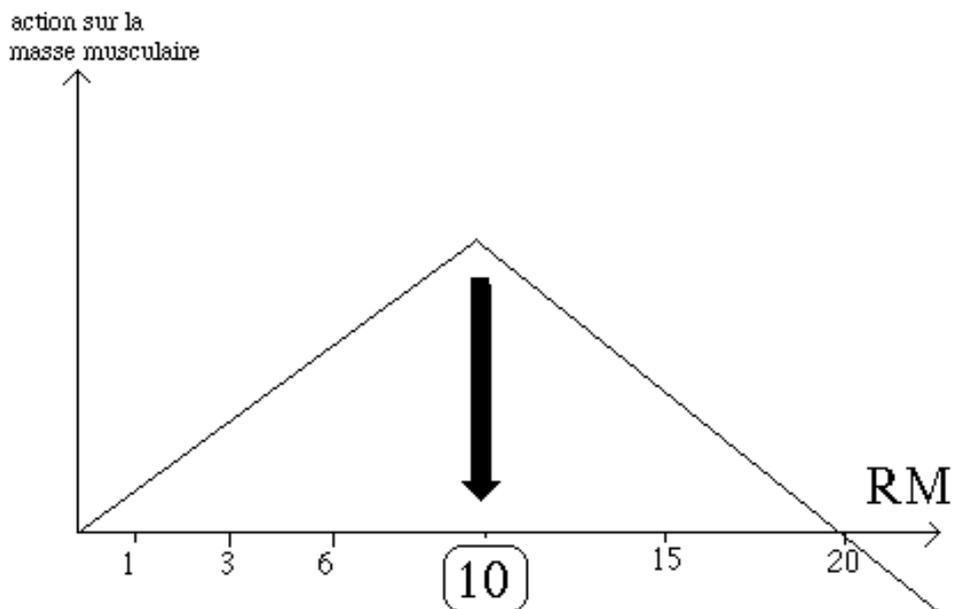


figure 4 a : influence du nombre de répétitions maximum sur le développement de la masse musculaire.

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)

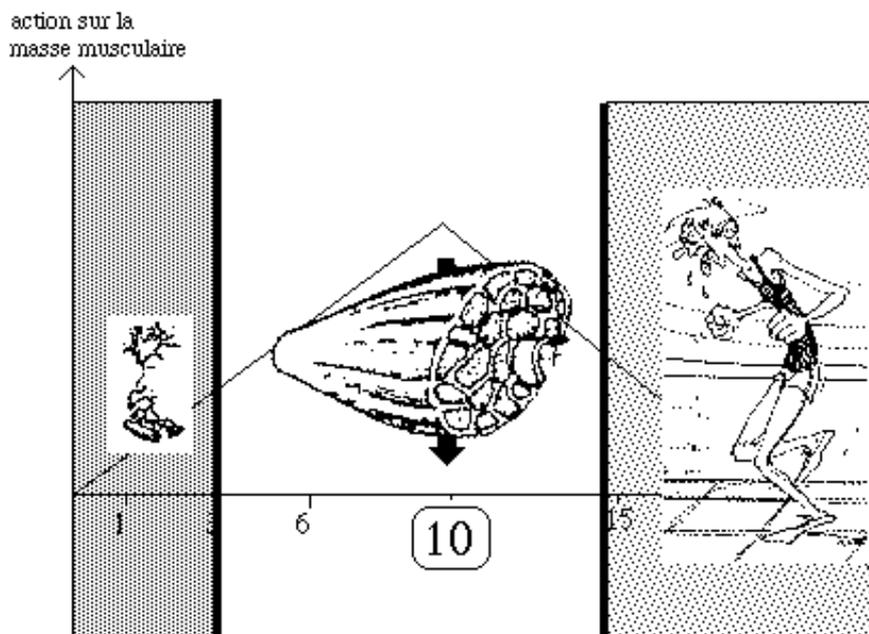


figure 4 b : influence du nombre de RM sur les facteurs de la force.

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

Pendant longtemps la classification des fibres s'est faite à partir d'une technique particulière de coloration de l'ATPase. Cette classification faisait apparaître des fibres IIa et IIb. Aujourd'hui la détermination du type de fibres se fait grâce à la myosine, plus précisément à partir des chaînes de myosine lourde (MHC : Myosin Heavy Chain)

Les fibres qui étaient répertoriées IIb dans la classification basée sur la coloration d'ATPase contiennent en fait de la MHC de type IIX (Schiaffino et Reggiani 1996).

Les fibres de type II comprennent :

- des fibres II a qui sont mixtes à métabolisme anaérobie et aérobie

- des fibres II x qui sont rapides par excellence car à métabolisme anaérobie uniquement. Les fibres IIb n'existent en fait que chez certains animaux (rongeurs) l'homme possède le gène de ces fibres mais celles-ci n'apparaissent pas. Toutefois selon Hoppeler on admet encore l'ancienne terminologie. Les trois types de fibres sont donc : I , IIa , IIx ou IIb

La figure 5 représente les différentes caractéristiques des fibres musculaires.

fibres	taille	force	résistance à la fatigue
LENTES ou I		↑ faible	→ importante
IIa ↗ RAPIDES ou II		↑ moyenne	→ moyenne
↘ IIx		↑ importante ↓	→ faible

figure 5: tableau des caractéristiques des fibres musculaires.

La transformation des fibres :

- *L'ordre de la transformation :*

Les fibres sont susceptibles de se transformer à la suite de certaines sollicitations. Sur la figure 6 on constate l'ordre de la transformation et l'existence de fibres mixtes ou hybrides comportant deux types de myosine. Si la transformation des fibres suit un ordre bien précis on a découvert que pour les fibres I et IIx on pouvait sauter directement d'un type à l'autre sans suivre l'ordre linéaire : ces fibres ont été appelées « jump fibers » (fibres « saut »)

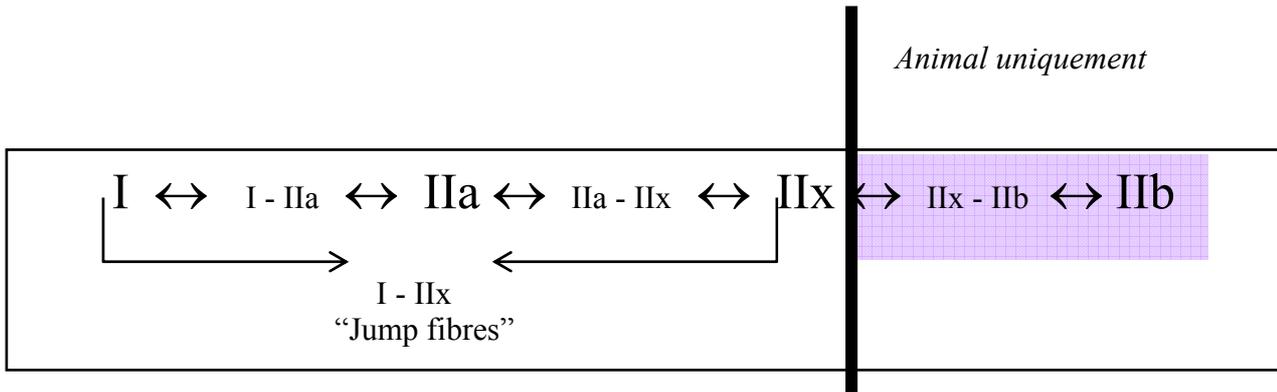


figure 6 : schéma de transformation des fibres selon Flück et Hoppeler (2003).

Les facteurs qui induisent la transformation :

La figure 7 présente les influences qui provoquent une transformation des fibres.

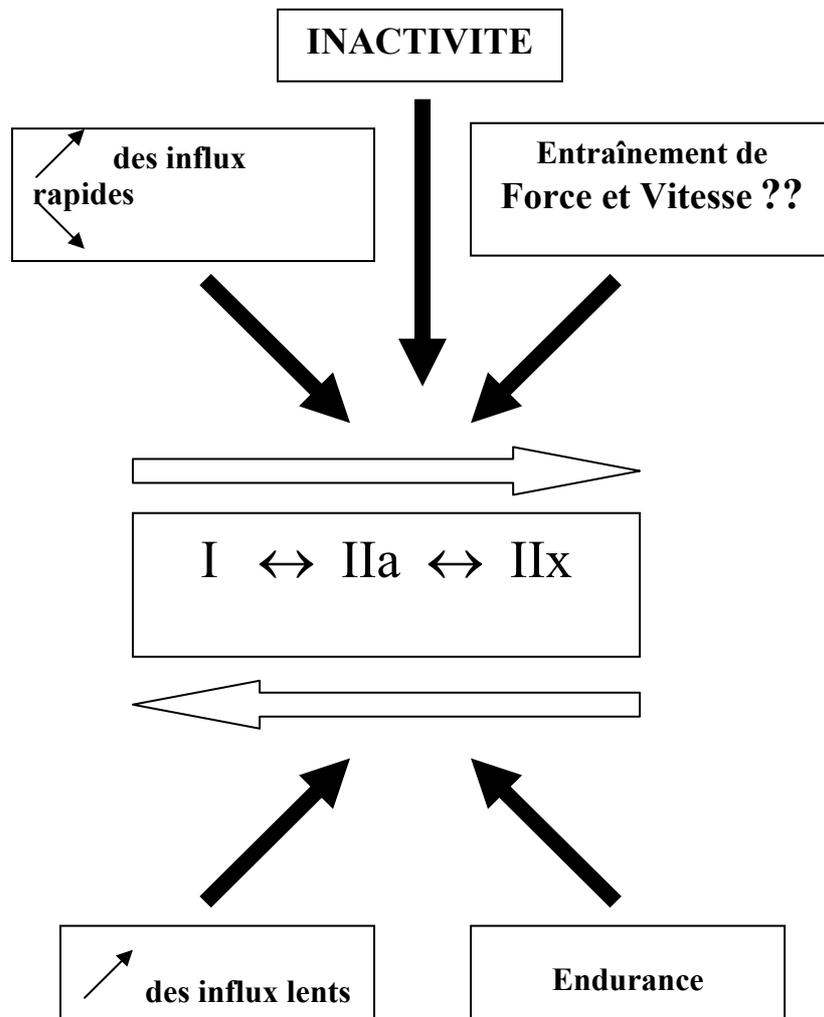


figure 7 : différents facteurs qui déterminent la transformation des fibres. (Flück et Hoppeler 2003)

Des fibres rapides aux fibres lentes :

Il ne fait aucun doute que l'augmentation des influx lents et l'entraînement d'endurance permettent de modifier les fibres. Des marathoniens de niveau international possèdent jusqu'à 80-90 % de fibres à myosine de type I, le reste étant constitué de fibre de type IIa. (Andersen et coll. 2000)

Des fibres lentes aux fibres rapides :

Le facteur le plus important est l'inactivité qui provoque la suppression des influx lents. On obtient cette inactivité en suspendant l'animal (suppression des influx anti-gravitaires) pendant de longues périodes. Il y a perte de force, diminution du volume des fibres mais transformation vers les fibres rapides. Chez l'homme on impose au sujet de vivre aliter pendant plusieurs semaines, une fonte musculaire se produit mais les fibres rapides augmentent en nombre. Par contre les études sur les effets d'un travail de musculation aboutissent à une transformation des IIx vers les IIa, ce qui est contradictoire avec ce que l'on pensait jusqu'à présent. Par contre dès que l'on arrête le travail de musculation le processus inverse se déroule (IIa vers IIx) et le niveau de fibres IIx est alors supérieur au niveau de départ (avant entraînement de musculation) (Andersen et Aagaard (2000)). Une des explications à ces résultats réside certainement dans le rapport de sollicitations entre influx lent et influx rapides. En effet au cours d'une journée les fibres reçoivent en permanence des influx lents, pendant une séance de musculation intense, le temps de sollicitation avec influx rapides est faible (10 mn environ pour une séance d'une heure et demie). Il nous semble donc que c'est au niveau de la taille des fibres qu'il faille chercher l'explication : la musculation augmente la section des fibres rapides.

L'architecture musculaire :

La distinction fibres lentes – fibres rapides ne permet pas d'expliquer toutes les transformations dues à l'entraînement ainsi que les différences interindividuelles. Les recherches récentes sur l'architecture des muscles marquent une avancée capitale dans la compréhension de la physiologie de l'entraînement. La technique d'analyse in vivo de l'arrangement des fibres musculaire avec la technique par ultrasons utilisée en premier par Fukunaga et Kawakami a fait évoluer la connaissance du fonctionnement musculaire.

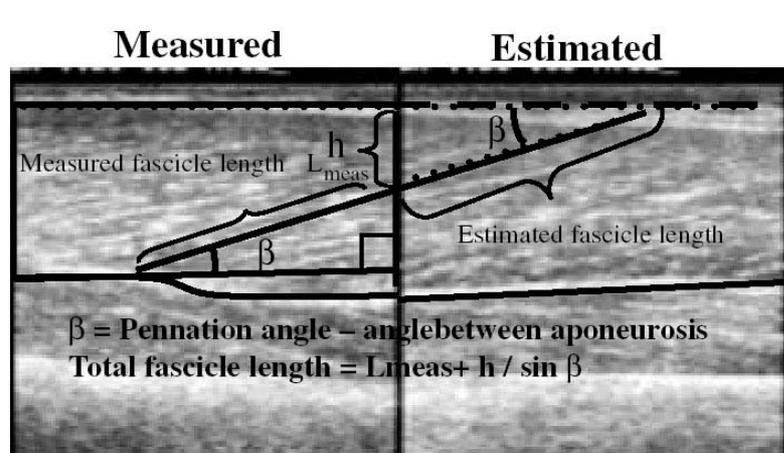


Figure 7a : image obtenue avec la technique par ultrasons. La méthode d'analyse est illustrée.

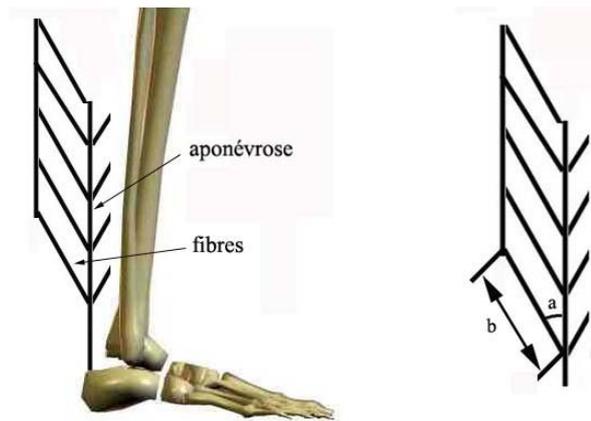


Figure 7b : représentation de la disposition des fibres, a) angle de pennation, b) longueur des faisceaux de fibres.

Plus les fibres sont longues plus elles comportent de sarcomères en série ce qui est favorable à la vitesse. Plus l'angle de pennation est faible plus la force exercée est importante. Des études récentes (Abe et coll. 2000, Kumagai et coll. 2000) ont montré que ces paramètres varient entre les athlètes. Abe et coll. démontrent une différence entre les sprinters et les coureurs de longues distances (fibres plus longues et angle de pennation inférieur pour les coureurs de vitesse). Mieux encore Kumagai et coll. obtiennent des différences significatives entre deux groupes de sprinters. Les sprinters à 10 secondes ont des faisceaux de fibres plus longs que les sprinters à 11 secondes, ainsi qu'un angle de pennation plus faible. Ils sont donc plus efficaces pour produire de la vitesse car des fibres plus longues signifient plus de sarcomères en série. Cette aptitude comporte un aspect génétique mais également une possibilité d'évolution grâce à l'entraînement.

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. Par contre la taille des fibres IIx a tendance à augmenter. C'est plus dans ce sens qu'il faut chercher les améliorations dues à l'entraînement de force.

On tient compte également de l'architecture musculaire en cherchant à augmenter le nombre de sarcomères. Le travail excentrique présente pour cela des avantages intéressants. Les méthodes de force explosive (séries avec exécution rapide) sont une autre solution.

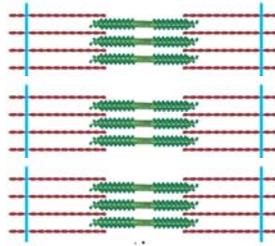
1.3) L'AUGMENTATION DES SARCOMERES EN SERIE:

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 s'il se trouve dans une position d'allongement. Proske et Morgan (2001) montrent que ce phénomène s'applique

également lors du travail de musculation. Le travail musculaire en excentrique est particulièrement efficace pour augmenter les sarcomères en série.

Sarcomères en parallèle



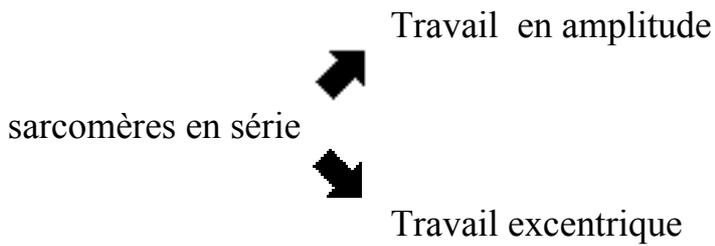
Sarcomères en série



Figure 8 : les 2 possibilités d'augmentation des sarcomères.

1.3.2.) Conséquences pratiques:

Pour obtenir un 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 spatial :

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.9). 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 x..

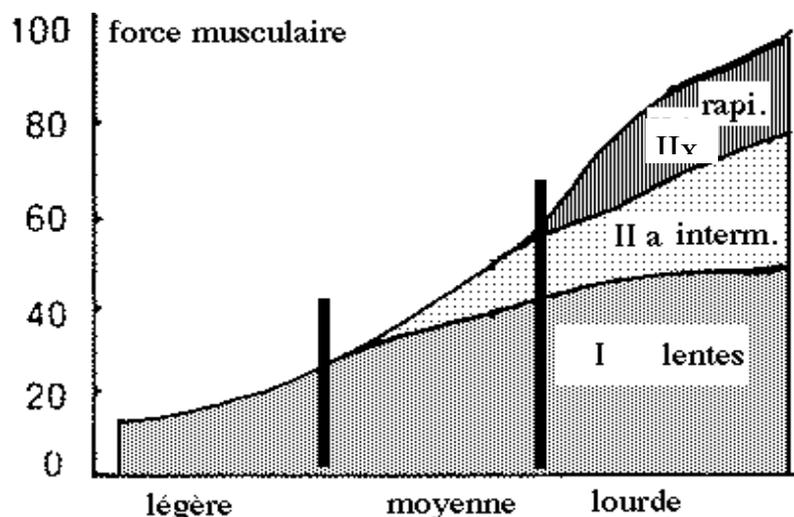


figure 9 : le recrutement des fibres en fonction de l'intensité de la charge (Costill 1980)

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. 10)

- figure 10 (I) Situation de départ: le débutant ne recrute que peu de fibres (points noirs)
- figure 10 (II) Au bout de quelques semaines, le nombre d'unités motrices recrutées augmente, sans hypertrophie.
- figure 10 (III) Dans la suite de l'entraînement c'est surtout l'hypertrophie qui est la cause principale du gain de force.

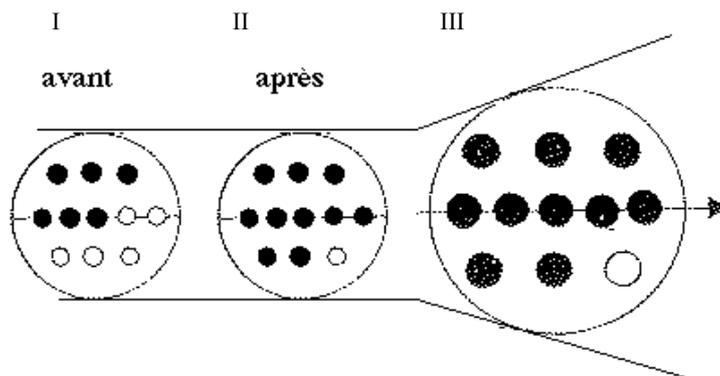


figure 10 : place des phénomènes de recrutement dans l'augmentation de force (d'après Fukunaga 1976)

Le recrutement temporel :

On peut augmenter la force en élevant la fréquence des impulsions envoyées aux unités motrices. L'entraînement en force permet aux athlètes d'augmenter la fréquence des impulsions afin de s'approcher du plateau de force maximale (fig. 10a)

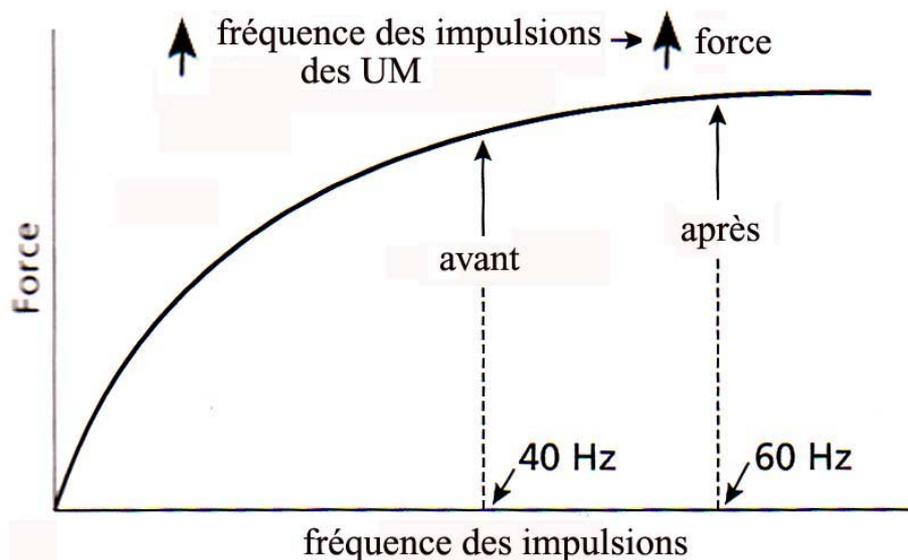


Figure 10a : effet de l'entraînement sur l'augmentation de la fréquence des impulsions et la force supérieure produite.

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 leur voix. Les unités motrices fonctionnent de la même manière. L'explication physiologique la plus probable est la suivante: (fig. 11)

Les unités motrices sont au départ naturellement synchronisées (fig. 11 a). Le circuit de Renshaw est l'agent de la désynchronisation par des actions inhibitrices sur les motoneurones (fig 11 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 11 c). Le stress est un facteur important pour parvenir à ce résultat. Les sauts en contrebass 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.

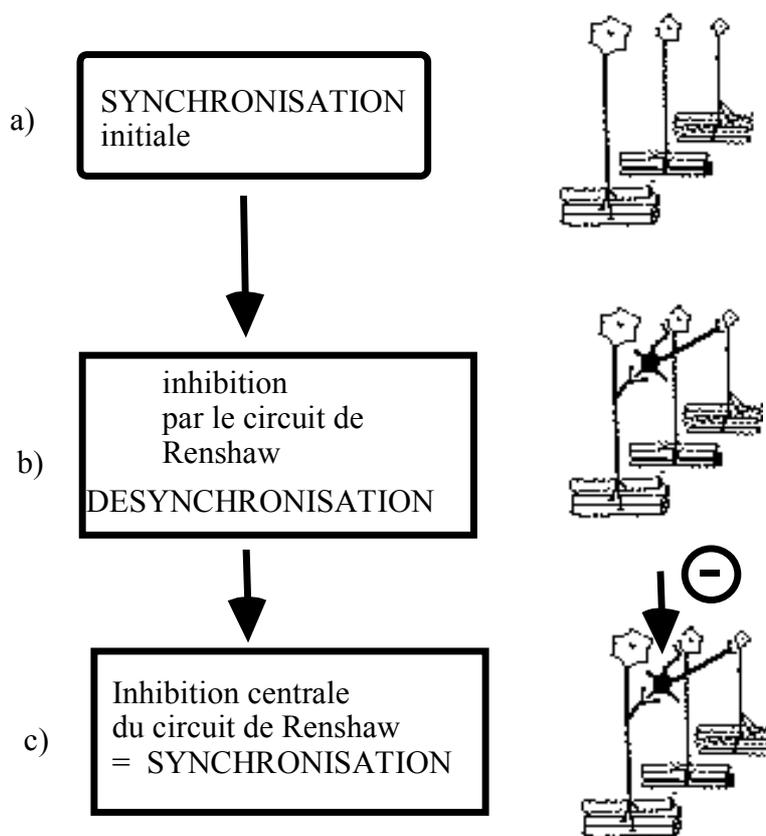


figure 11: la synchronisation des unités motrices

Pour Stemmler (2002) l'amélioration de la synchronisation des UM influence la montée en force (figure 12) mais il n'est pas exclu qu'elle puisse augmenter également la force maximale même si cette donnée reste à démontrer

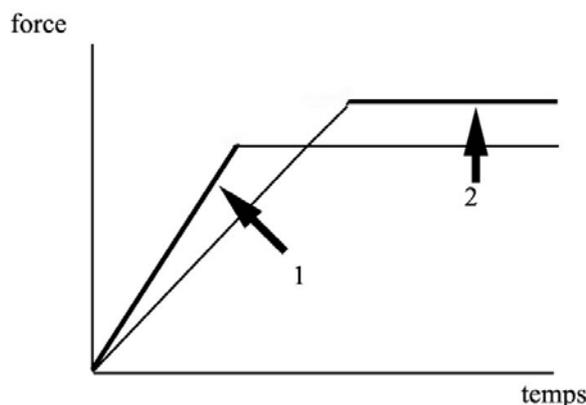


figure 12 : l'effet de la synchronisation des UM sur la montée en force. 1) elle améliore la montée en force, 2) il n'est pas exclu qu'elle agisse sur la force maximale.

2.2.2.) Conséquences pratiques:

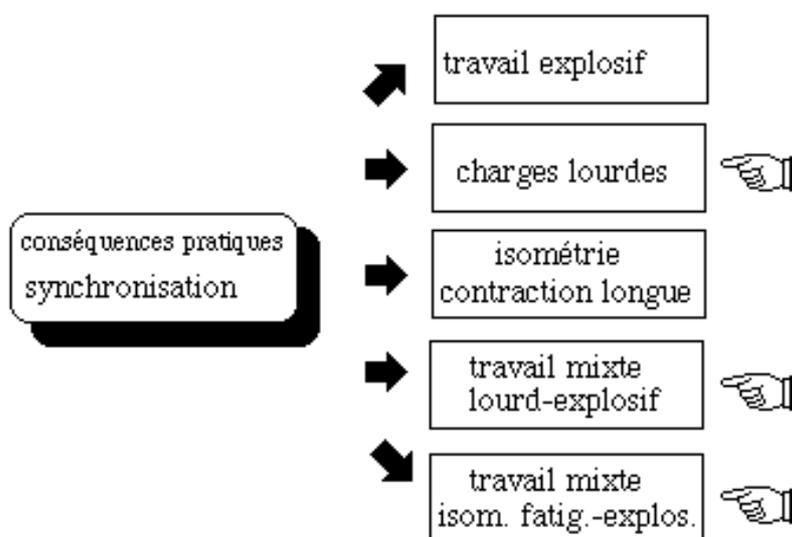


figure 13 : les moyens pour améliorer la synchronisation (Cometti, 1989)

La figure 13 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. La figure 14 montre une analyse musculaire des deux mouvements classique de la force.

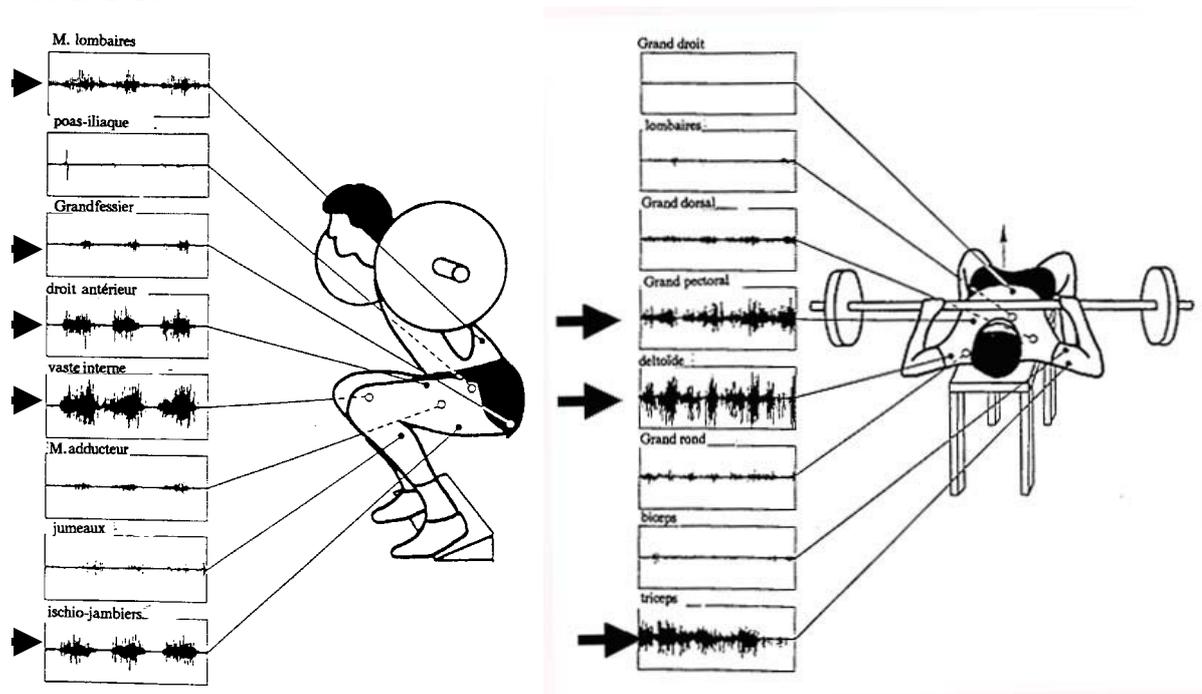


Figure 14 : analyse musculaire du squat et du développé couché (d'après Kuntz et coll. 1988)

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-DETENTE :

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 du système tendon-muscle.

3.1.) LE REFLEXE MYOTATIQUE:

3.1.1.) Données physiologiques:

Il est mis en évidence par Schmidtbleicher (1985a)(fig 15) sur un saut en contrebas

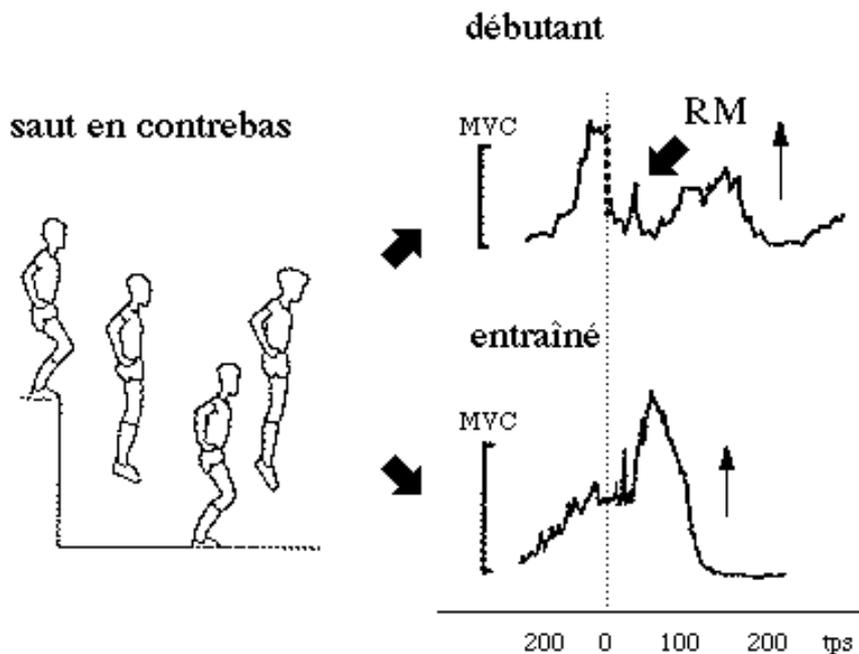


figure 15 : l'activité électrique du triceps lors d'un saut en contrebas de 1,10m

Le tracé représente l'activité électrique du muscle (la sollicitation nerveuse du muscle). MVC représente la sollicitation musculaire obtenue chez l'athète 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. 16). On obtient ainsi un étirement dans une position inhabituelle et une efficacité à l'entraînement supérieure.



figure 16 : saut en contrebas avec flexion à 90° (d'après Bosco 1985)

3.2.) L'ELASTICITE DU SYSTEME TENDON-MUSCLE :

3.2.1) Données physiologiques:

Elle est illustrée par le schéma de Hill (fig 17) 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 que l'on situe aujourd'hui dans une protéine qui s'appelle la titine comme le montre la figure 18.

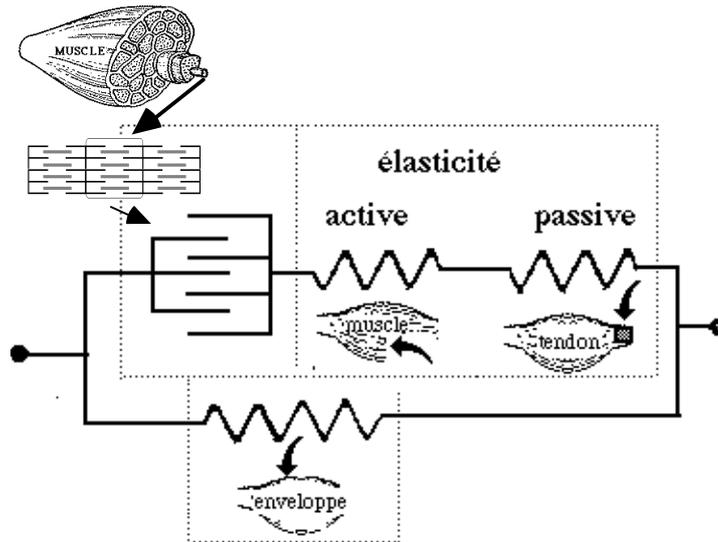


figure 17 : le schéma de Hill (modifié par Shorten, 1987)

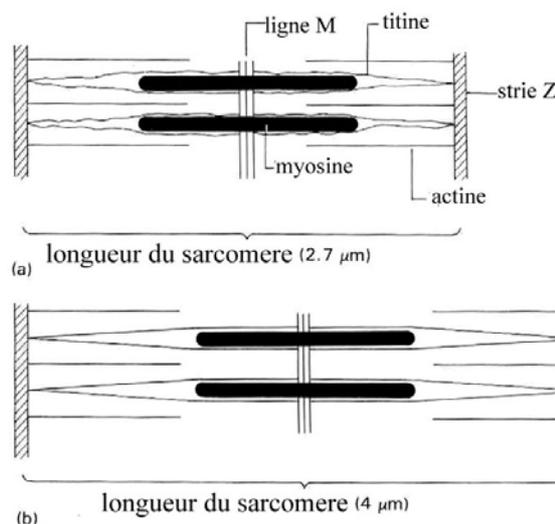


figure 18 : représentation de la titine, elle va de la myosine à la strie Z. En (a) le sarcomère est dans sa position de repos la titine est relâchée, en (b) le sarcomère est étiré la titine est tendue.

La titine est donc susceptible de stocker de l'énergie et de la restituer.

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. On utilise pour mesurer ces tests deux dispositifs : un tapis de contact (l'ergojump) et deux barres avec cellules (l'optojump). Les quatre tests les plus utilisés sont le Squat Jump (SJ) et le Countermouvement Jump avec les bras (CMJB), le Drop Jump et le test de réactivité.

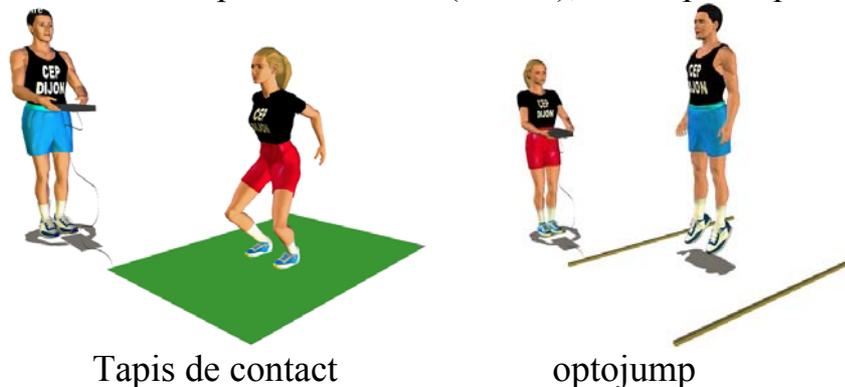


Figure 19 : l'ergojump de Bosco et l'optojump.

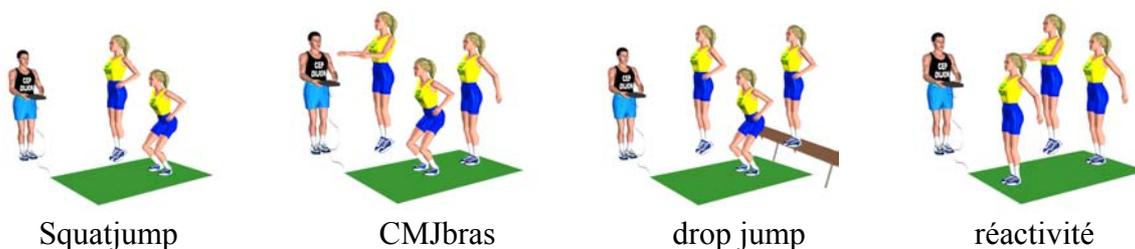


Figure 20 : les 4 tests les plus utilisés.

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

BIBLIOGRAPHIE

- Abe T, Kumagai K, Brechue WF., Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners, *Med Sci Sports Exerc.* 2000 Jun;32(6):1125-9.
- Adam K. und Vercoshanski Y. V. (1976) *Modernes Krafttraining in Sport*, Berlin: Bartels und Wernitz.
- Andersen JL, Aagaard P. Myosin heavy chain IIX overshoot in human skeletal muscle. *Muscle Nerve.* 2000 Jul;23(7):1095-104.
- 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.
- 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.
- Fluck M, Hoppeler H. Molecular basis of skeletal muscle plasticity from gene to form and function. *Rev Physiol Biochem Pharmacol.* 2003;146:159-216. Epub 2003 Jan 14. Review.
- Fox E.L. and Matthews D.K. (1984) *Bases physiologiques de l'entrainement*, 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 alterations: an immunocytological study in man. *Int. J. Sports Medecine*, 5, 15-18.
- Gambetta V. (1987) *Les principes de l'entrainement pliométrique*, In traduction Insep n° 579. (edited by Insep)
- Goubel F. Van Hoecke J. (1982) *Biomécanique et geste sportif*, In *Cinésiologie XXI*, 41-51.
- Hakkinen, K. and Komi, P. V. (1981) Effect of different combined concentric and eccentric muscle work regimens on maximal strength 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, *Medecine and science in sport*, 4, 2, 111-115.
- Kumagai K, Abe T, Brechue WF, Ryushi T, Takano S, Mizuno M. Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J Appl Physiol.* 2000 Mar;88(3):811-6.
- 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 y Insep)
- Pletnev, B. (1975) The effectiveness of différent 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 différent combined work with equivalents 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.
- Proske U, Morgan DL., *Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications*. *J Physiol*. 2001 Dec 1;537(Pt 2):333-45. Review.
- Schiaffino S, Reggiani C. *Molecular diversity of myofibrillar proteins: gene regulation and functional significance*. *Physiol Rev*. 1996 Apr;76(2):371-423. Review.
- 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
- 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.