

50376
1985
201

50376
1985
201

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

THÈSE DE TROISIEME CYCLE

BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES

(Mention Physiologie Nerveuse et Musculaire)

présentée par

Philippe POULAIN



**MODIFICATIONS DES PROPRIETES MECANQUES DU
MUSCLE HUMAIN APRES ENTRAINEMENT
DE LA FORCE**

Soutenue le 15 Juin 1985 devant la Commission d'Examen

Jury :	Mme	Y.	MOUNIER Président
	MM.	E.	PERTUZON Rapporteur
		L.	LEWILLIE
		F.	GUERRIN Examineurs
		J.C.	CNOCKAERT

Travail réalisé au laboratoire de Physiologie Neuromusculaire

Le travail présenté a été réalisé au Laboratoire de Physiologie Neuromusculaire de l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

Je remercie particulièrement Monsieur le Professeur PERTUZON, qui m'a accueilli dans son laboratoire et dont les conseils précieux m'ont permis de mener à bien ce travail.

Madame le Professeur MOUNIER a bien voulu me faire l'honneur de présider cette thèse, je lui en sais gré.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur LEWILLIE qui a accepté de siéger à mon jury de thèse.

Monsieur le Professeur GUERRIN me fait l'honneur de participer à ce jury. Je l'en remercie très sincèrement.

Monsieur CNOCKAERT, vos conseils et votre aide m'ont été précieux durant ma formation et dans la phase ultime de ce travail. Soyez assuré de ma reconnaissance.

J'associe à ces remerciements les membres du Laboratoire de Physiologie Nerveuse et Musculaire pour le soutien qu'ils ont pu manifester en différentes occasions, ainsi que les collègues de l'U.E.R. E.P.S. dont les aides, aussi diverses qu'efficaces, ont facilité la mise à terme de ce travail.

Ma reconnaissance va également aux collaborateurs qui ont assuré la réalisation matérielle de cette thèse :

. les Sportifs de l'U.E.R. E.P.S. et de l'U.S. Tourcoing qui ont apporté leurs concours à l'expérimentation ;

. Monsieur COISNE dont le mérite est grand d'avoir protégé mes doigts et son outillage en transformant lui-même le matériel ;

. sans oublier Mesdames SPITAEELS, MASQUELIER et DODEY qui m'ont fait le grand plaisir d'assurer avec célérité l'achèvement de ce travail.

PLAN GENERAL

=====

NOMENCLATURE	1
INTRODUCTION	3
TECHNIQUES ET PROTOCOLE	33
RESULTATS	
COMMANDE MOTRICE ET PERFORMANCE MECANIQUE DU MUSCLE	56
PROPRIETES BIOMECHANIQUES MUSCULAIRES ET PERFORMANCE MECANIQUE	
ELASTICITE SERIE	82
PROPRIETES CONTRACTILES	95
RESUME - CONCLUSION	126
BIBLIOGRAPHIE	140

N O M E N C L A T U R E

=====

BB	=	biceps brachii
BR	=	brachio radialis
C	=	couple (en Newton mètre)
CC	=	composante contractile
CEP	=	composante élastique parallèle
CES	=	composante élastique série
CONC	=	concentrique
DEM	=	délai électromécanique
E	=	entraînement
EMG	=	électromyogramme
EMGi	=	électromyogramme intégré
EXC	=	excentrique
F	=	force
F ₀	=	force maximale extrapolée quand V = 0
FE	=	fléchisseur équivalent
F MAX	=	valeur maximale enregistrée de force
I	=	inertie (en m ² x kg)
ISO	=	isométrique
K	=	compliance ($\frac{\Delta l}{\Delta F}$ en m x N ⁻¹)
kg	=	kilo
l	=	longueur du muscle
l ₀	=	longueur du FE pour un angle du coude de 75°
M	=	masse (en kg)

m = mètre
msec = milliseconde
N = Newton
P = puissance (en watt) - ($P = F \times V$)
P MAX = valeur maximale enregistrée de P
Q = quantification de l'EMGi
QR = quick-release
sec = seconde
t = temps
TB = triceps brachii
u.a. = unité arbitraire
UM = unité motrice
V = vitesse de raccourcissement (en $m \times sec^{-1}$)
V₀ = vitesse maximale extrapolée quand $F = 0$
V MAX = valeur maximale enregistrée de V
V_c = vitesse de contraction ($\frac{\Delta F}{\Delta t}$ en $N \times sec^{-1}$)
W = watt
 θ = déplacement angulaire en radian
 θ' = vitesse angulaire en $radian \times sec^{-1}$
 θ'' = accélération angulaire en $radian \times sec^{-2}$
 Ω = ohm.

INTRODUCTION

I- <u>DEFINITIONS DE LA FORCE</u>	6
A- <u>NOTION DE FORCE DANS LE GESTE SPORTIF</u>	6
B- <u>FORCE ET CONTRACTION MUSCULAIRE : APPLICATIONS DANS LE GESTE SPORTIF</u>	8
1- Vitesse cyclique	8
2- Vitesse acyclique	9
3- Force explosive - réactive	9
4- Force explosive - balistique	9
5- Force explosive - tonique	9
6- Force phasique - tonique	9
7- Force phasique	9
8- Force tonique.	9
II- <u>FORCE ET ENTRAÎNEMENT</u>	11
A- <u>ORGANISATION PRATIQUE DU DEVELOPPEMENT DE LA FORCE</u>	14
1- Méthodes d'entraînement	14
a) entraînement de force dynamique (auxotonique)	14
b) entraînement de force statique ou isométrique	14
2- Composition des séries d'entraînement	15
a) méthode "extensive"	15
b) méthode "intensive"	16
c) organisation des séries	16
B- <u>EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT DE LA FORCE</u>	17
1- Musculation et force musculaire	17
2- Entraînement de la force et vitesse de mouvement	17
3- Développement de la force et vitesse de raccourcissement	18
4- Force et élasticité musculaire	20
5- Entraînement et structure musculaire.	20
III- <u>PROPRIETES MECANQUES DU MUSCLE</u>	21
A- <u>RELATION FORCE - LONGUEUR (F-L)</u>	22
B- <u>RELATION FORCE - VITESSE (F-V)</u>	24
C- <u>RELATION COMPLIANCE - FORCE (K-F).</u>	26

IV- <u>OBJET DE L'ETUDE</u>	28
A- <u>CHOIX DU THEME</u>	28
B- <u>CHOIX DE LA PREPARATION</u>	28
1- Etude des variables biomécaniques	28
2- Choix des muscles et notion de fléchisseur équivalent	29
3- Angle d'équilibre	29
4- Contrôle électromyographique.	31

Les muscles, moteurs du mouvement, transforment l'énergie chimique en énergie mécanique externe. La résistance opposée au déplacement des segments est égale, inférieure ou supérieure à la tension développée par le muscle. Il s'ensuit des modalités particulières de la contraction musculaire qui permettent à l'homme d'explorer son environnement ou de rester immobile (tableau -I-).

Si la résistance est faible, le mouvement peut être rapide. Si la résistance est élevée, la force développée est forte et le mouvement est plus lent. La puissance maximale est obtenue pour des forces et vitesses proches du 1/3 de leurs valeurs maximales.

Dans tout travail, il est nécessaire de fixer la puissance en fonction de la durée pendant laquelle l'exercice se déroule. WILKIE (1960) par exemple, montre la décroissance de la puissance développée en fonction de la durée (figure -1-). L'activité musculaire n'est possible qu'à la condition d'assurer un apport en énergie chimique.

L'entraînement qui a pour but l'amélioration des performances est l'objet de notre étude.

Nous envisageons l'étude des modifications des propriétés mécaniques du muscle à l'entraînement de force.

TENSION (T) RESISTANCE (R)	TYPE DE CONTRACTION	FONCTION	TRAVAIL MECANIQUE EXTERNE
T > R	Concentrique	Accélération	positif : $W = F \times D$
T = R	Isométrique	Fixation	nul : $W = F \times 0$
T < R	Excentrique	Décélération	négatif : $W = F \times (-D)$

Tableau -I- CLASSIFICATION DES TYPES DE CONTRACTIONS ET D'EXERCICES.

- W = travail en joules
- F = force en newton
- D = distance en mètres.



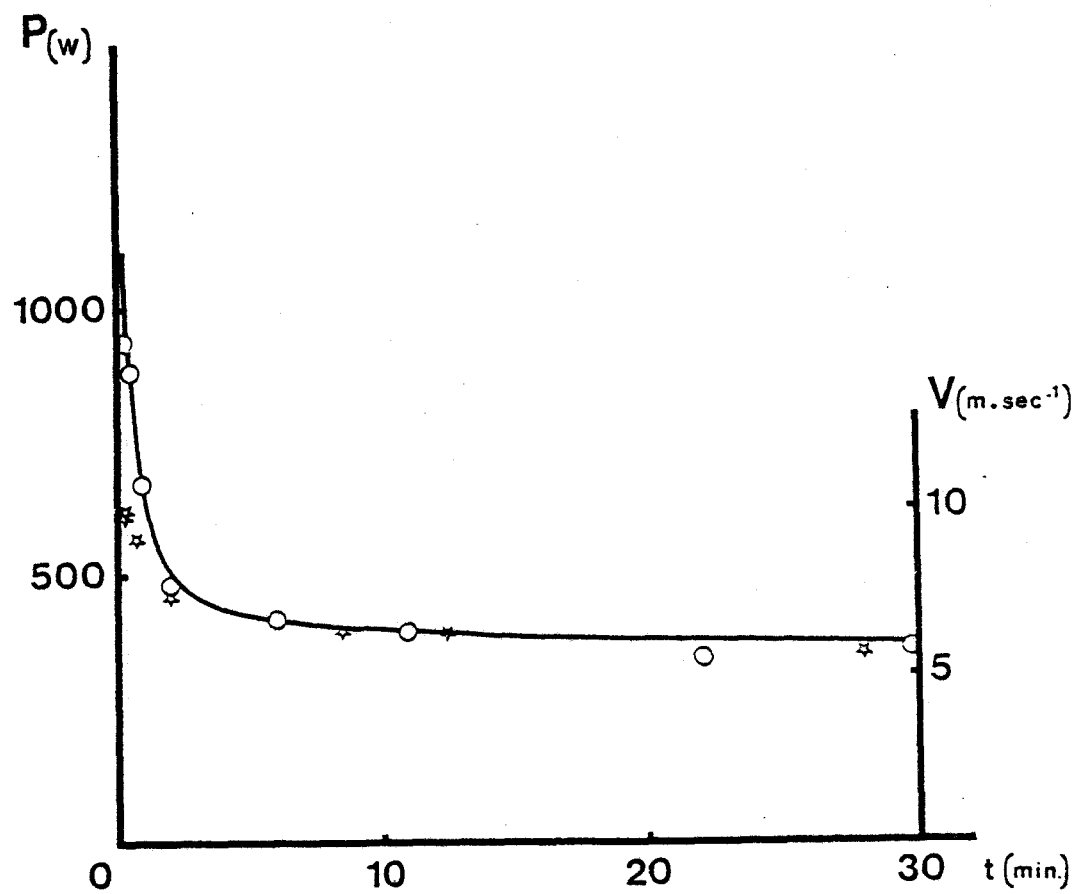


Figure -1- Puissance musculaire développée par l'homme en fonction de la durée de l'exercice, d'après WILKIE - 1960.

- puissance mesurée
- ☆ vitesse de course établie d'après les records du monde de course à pieds.

I- DEFINITIONS DE LA FORCE

Dans le domaine sportif, la force traduit une qualité physique qui s'exprime dans la spécificité du geste. Elle n'est pas la simple expression ni d'une tension musculaire, ni du produit de l'accélération et d'une masse. Mais ces notions sont présentes ainsi qu'en témoigne le schéma descriptif de la force d'après ADAM et WERSCHOSHANSKIJ (1978) (tableau -II-).

Il convient donc de définir la force selon deux aspects :

- la force, comprise en tant que qualité nécessaire à la réalisation du geste sportif,
- la force dans son approche physiologique de la contraction musculaire.

A- NOTION DE FORCE DANS LE GESTE SPORTIF

La force a été cultivée depuis l'Antiquité à des fins de préparation d'athlètes pour les épreuves de lutte. Au cours du Moyen-Age, la force, normalement au service des hommes en temps de guerre, est mise en valeur dans les foires en temps de paix. A partir du 19ème siècle, elle est présentée dans un ensemble de qualités physiques et ne fait plus l'objet d'un développement systématique distinct des autres qualités physiques.

AMOROS (1848) dans son "Nouveau manuel d'éducation physique gymnastique et morale" propose un ensemble de qualités physiques dont "la force des différentes parties du corps".

Les précurseurs de l'éducation physique moderne comme LING ou AMOROS se démarquent du courant lancé par les "haltérophiles-lutteurs" qui jouissent d'une grande réputation au cours du 19ème siècle.

BELLIN DU COTEAU (1930) propose une classification des capacités physiques. La vitesse, l'adresse, la résistance et la force représentent les qualités de base de l'individu. Cette classification établit un ordre qui

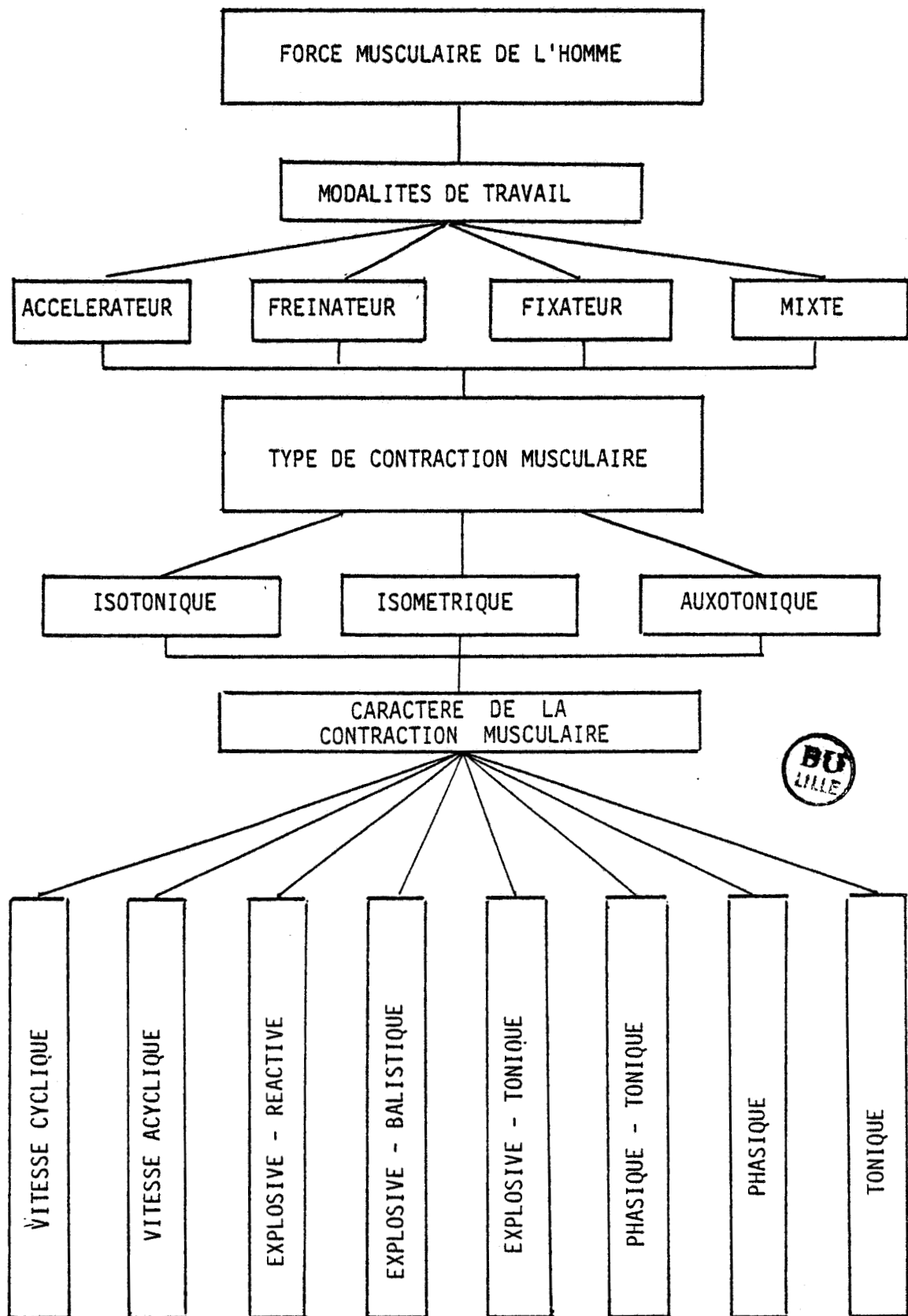


Tableau -II- SCHEMA DESCRIPTIF DE LA FORCE d'après ADAM et WERSCHOSHANSKIJ - 1978 (explication dans le texte).

reflète l'image sociale de ces qualités. Ainsi la force est située en dernier lieu, l'adresse et la vitesse se disputent la première place et la résistance est parfois placée avant la vitesse. Il décrit les qualités en les associant à des épreuves sportives.

HEBERT (1941) traite de la force en des termes particuliers. "L'être fort est résistant, musclé, vif, adroit, énergique, endurant et sobre".

LE BOULCH (1960) étudie les "facteurs de la valeur motrice" mais ne propose pas de batterie-test qui permet de les isoler.

FLEISHMAN (1964), tableau -III- dans sa "sphère de la motricité" décrit particulièrement le "domaine" de la force qu'il mesure à l'aide de performances. Il montre que la force est plus ou moins liée aux qualités de vitesse.

La force représente donc un domaine d'une grande complexité. Son étude, au cours de la contraction musculaire, ne pourra se faire qu'en précisant les modalités du travail musculaire (tableau -II-).

B- FORCE ET CONTRACTION MUSCULAIRE : APPLICATIONS DANS LE GESTE SPORTIF

WEINECK (1983), reprenant les travaux de WERSCHOSHANSKIJ (1978), propose quelques définitions des termes significatifs du caractère de la contraction musculaire.

On peut se rendre compte que les termes ne recouvrent pas toujours les mêmes aptitudes que celles définies par FLEISHMAN (tableau -III-).

Cette terminologie se superpose peu à celle utilisée par les physiologistes.

1- Vitesse cyclique

C'est un travail répétitif avec maintien du niveau de performance au plus haut niveau pour une durée de 6 à 10 secondes. Elle est fortement corrélée avec la force dynamique (possibilité de mobiliser des charges lourdes à grande vitesse).

Elle est rencontrée dans les épreuves de sprint en athlétisme.

2- Vitesse acyclique

La force mise en jeu est développée face à une résistance représentée par une inertie. C'est la vitesse de changement de direction que propose FLEISHMAN (Tableau-III-). Elle est présente dans les sports collectifs.

3- Force explosive - réactive

La mise en oeuvre maximale de la force est réalisée suite à un étirement musculaire. Elle est à associer à des qualités de détente. On la trouve dans toutes les préparations à un appel.

4- Force explosive - balistique

La mise en oeuvre maximale de cette force est faite contre des charges relativement faibles. On la trouve dans les lancers.

5- Force explosive - tonique

C'est la mise en oeuvre de force maximale pour surmonter des charges importantes avec une rapide évolution de la force. On la trouve en haltérophilie.

6- Force phasique - tonique

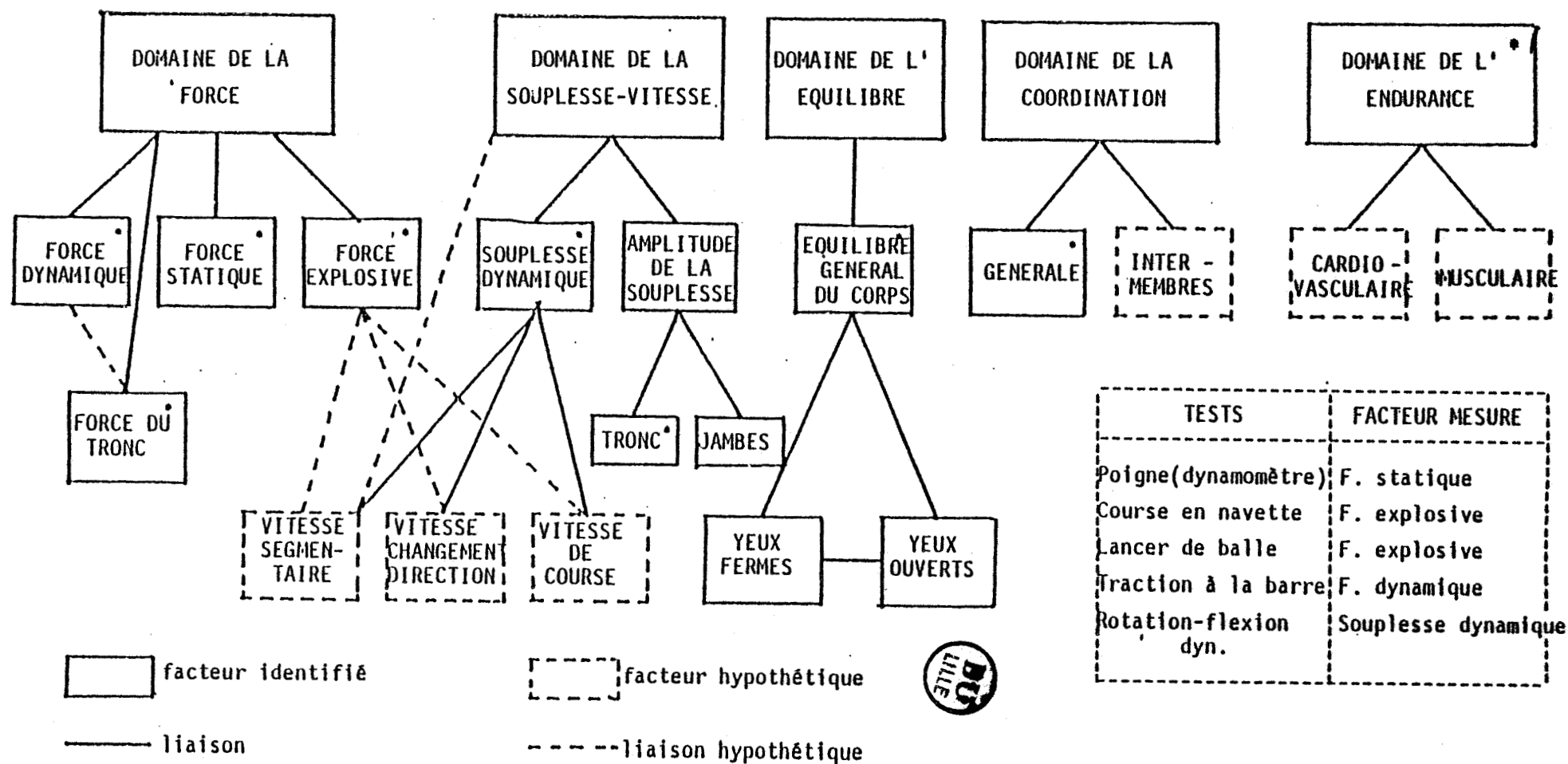
C'est l'alternance de contractions musculaires phasiques et toniques que l'on retrouve dans la combinaison d'éléments en gymnastique.

7- Force phasique

Il s'agit de gestes à caractère cyclique qui réclament un niveau de force pendant une durée plus ou moins longue. Elle fait intervenir la notion d'"endurance de force".

8- Force tonique

Il s'agit de contractions fortes et longues dans lesquelles, la vitesse d'évolution de la force n'est pas décisive. On la retrouve dans les positions tenues en gymnastique (contraction isométrique).



* facteur mesuré par la batterie test de FLEISHMAN

Tableau -III- CONSTRUCTION D'UN MODELE DE LA MOTRICITE INSPIRE DES TRAVAUX DE FLEISHMAN.

Dans ces conditions, on comprend toute la difficulté qu'il y a d'effectuer une étude quantifiée de la force. De plus, étant données les nombreuses interrelations qui existent entre les variables de la performance (tableau -IV-), il convient d'étudier les effets de l'entraînement de force sur les autres propriétés mécaniques du muscle afin de réaliser le meilleur transfert possible du développement des qualités physiques sur la performance motrice.

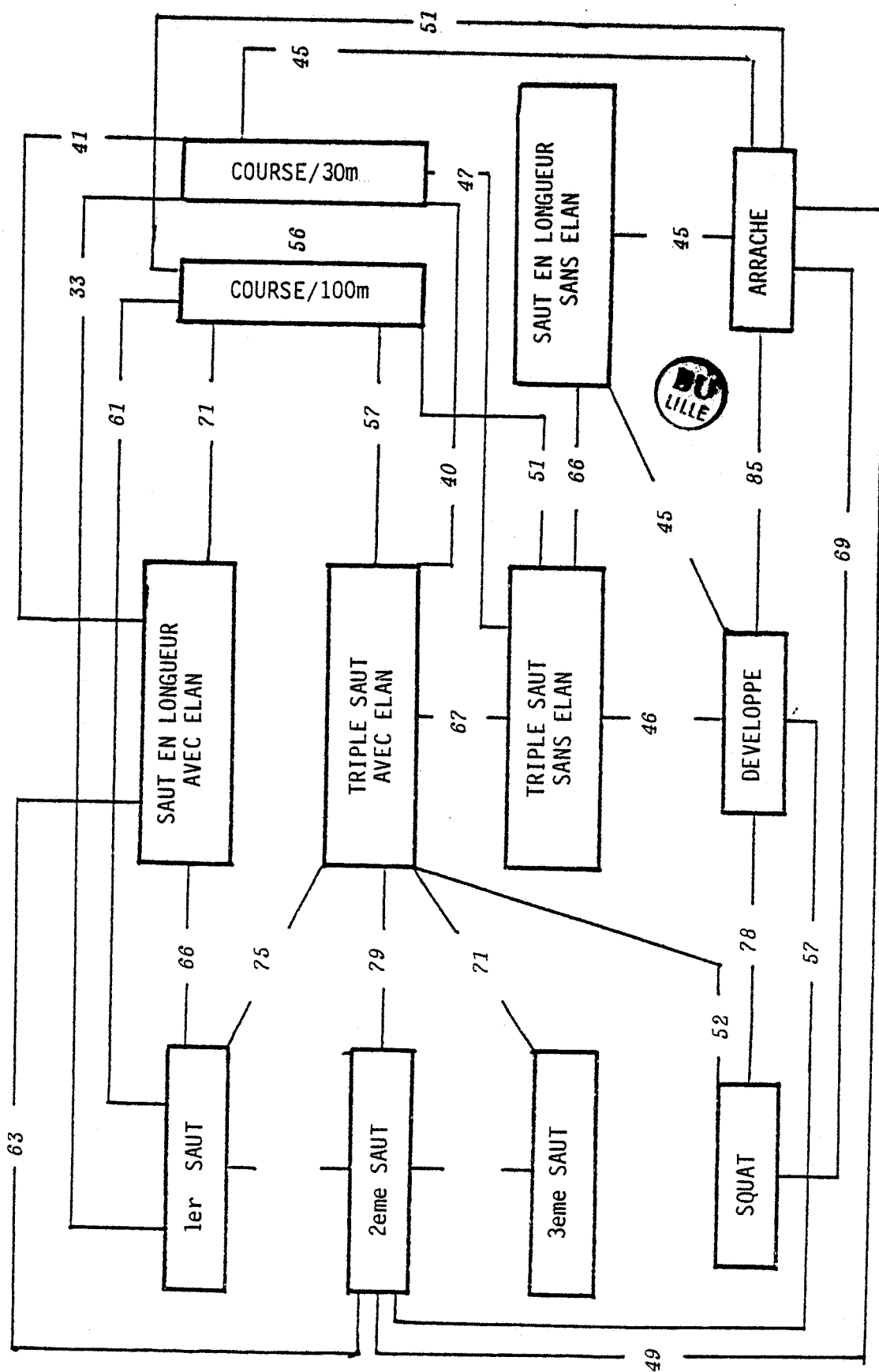
II- FORCE ET ENTRAÎNEMENT

L'amélioration des performances est le résultat des connaissances de plus en plus précises des effets de l'exercice sur l'organisme. Les principes de la répétition et de la quantité des exercices d'entraînement étaient déjà connus des grecs. Mais il faut attendre le 19ème siècle et le développement du sport moderne pour redécouvrir certaines règles de l'entraînement.

L'entraînement privilégia d'abord la quantité des exercices, puis les méthodes devinrent plus intensives et les exercices d'entraînement simulèrent la compétition.

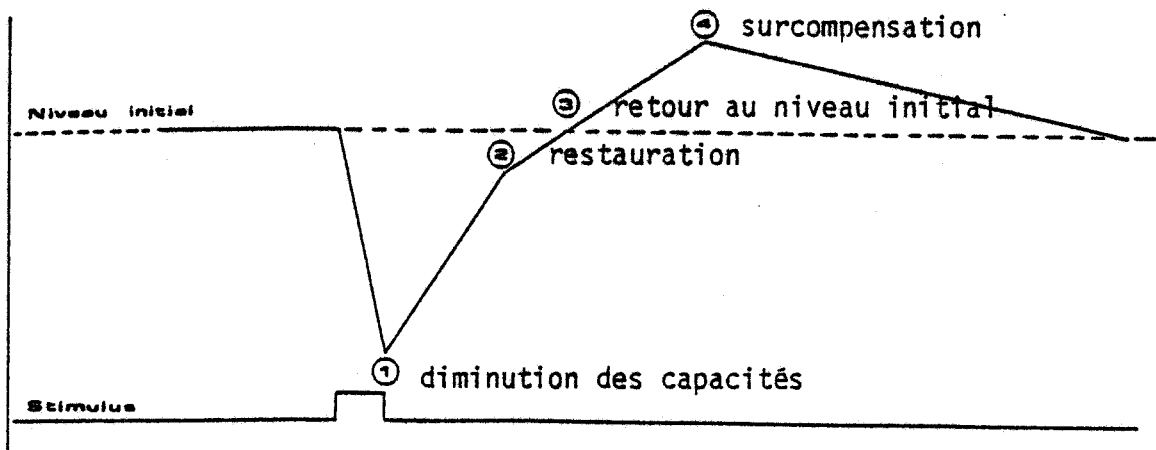
Ensuite le travail intermittent prit en compte la charge d'entraînement et l'intervalle de repos entre les exercices. Cette méthode a permis la réalisation d'un travail plus important avec une fatigue limitée. DE LORME (1945) appliqua cette dernière méthode au développement de la force.

On s'est aperçu ensuite, que la récupération incomplète des efforts provoque une amélioration des performances plus importante que celle qui résulte d'une récupération complète (figure -2-). De ce principe de surcharge décrit par MATVEEV (1976), résulte un "phénomène de surcompensation" qui sert de base à la construction de tout plan d'entraînement.



Squat : flexion sur les jambes avec haltères sur les épaules

Tableau -IV- ÉTABLISSEMENT DES CORRELATIONS ENTRE LES RESULTATS A DIFFERENTS TESTS POUR UNE POPULATION DE 180 TRIPLE-SAUTEURS (d'après ADAM et WERSCHOSHANSKIJ - 1978).



a- Variation de la capacité de travail sous l'effet d'une charge d'entraînement

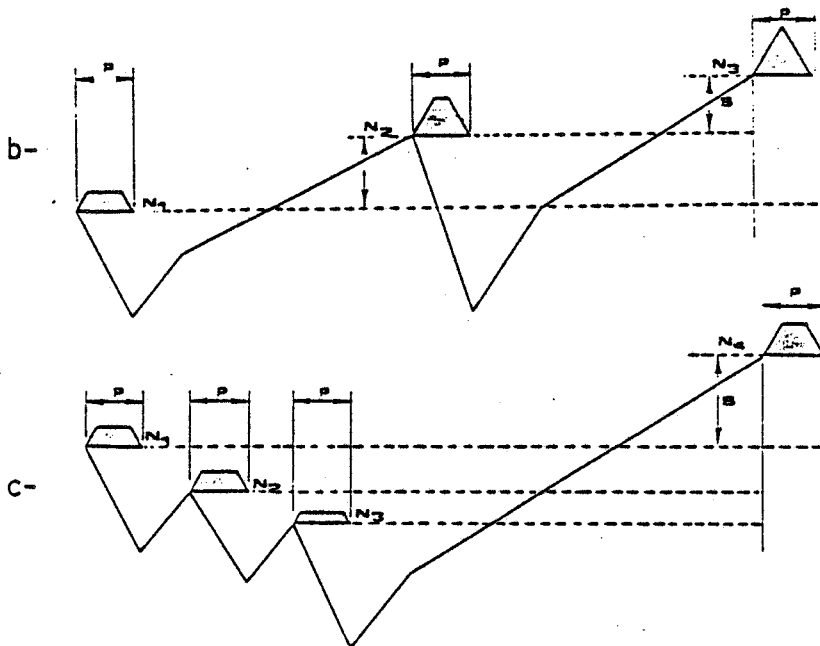


Figure -2- Organisation de l'entraînement d'après le principe de la surcompensation, d'après MATVEEV (1976).

- La surface de P représente la quantité de travail d'une séance
- N représente l'état du sujet avant la séance d'entraînement
- S représente le niveau de la surcompensation.

Après un exercice, on note une diminution des capacités de l'organisme. Puis s'installent les phases de restauration et de surcompensation (figure -2a-). La surcompensation est fonction de la diminution des capacités. On peut solliciter l'organisme, soit en le soumettant à des charges de plus en plus fortes (figure -2b-) lorsqu'il est en phase de surcompensation, soit en le soumettant à des charges plus légères lorsqu'il est en phase de restauration (figure -2c-).

A- ORGANISATION PRATIQUE DU DEVELOPPEMENT DE LA FORCE

1- Méthodes d'entraînement

Elles sont variées et caractérisent les modalités de la contraction musculaire présentées dans le tableau -I-, elles sont spécifiques du type de force musculaire que l'on veut développer (tableau -II-).

a) entraînement de force dynamique (auxotonique)

Il fait intervenir des formes mixtes de la contraction musculaire qui recouvrent une part d'isotonie et une part d'isométrie.

Cet entraînement peut se faire en surmontant une résistance (régime concentrique), ou en cédant à une résistance (régime excentrique).

La combinaison de ces deux formes de travail peut conduire à :

- . l'entraînement isocinétique, lorsque la vitesse est constante et le changement de régime de contraction progressif,
- . l'entraînement plyométrique ou réactif pour lequel le changement de régime de contraction musculaire est brutal.

b) entraînement de force statique ou isométrique

Dans cette méthode, il n'y a pas de raccourcissement ou étirement visible, mais seulement une tension accrue.

On trouve une forme particulière de ce type d'entraînement avec les techniques de stimulation électrique du nerf ou du muscle.

2- Composition des séries d'entraînement

Quelle que soit la méthode d'entraînement, la séance se compose d'exercices regroupés en série dont la longueur est fonction de la valeur de la charge (tableau -V). Le nombre de séries d'une séance évolue en général de 6 à 8.

INTENSITE	RESISTANCE (en % du maximum)	NOMBRE DE REPETITIONS	METHODES
Maximale	100	1	INTENSIVE
Submaximale	99 - 90	2 à 3	
Importante I	89 - 80	4 à 6	
Importante II	79 - 70	7 à 10	EXTENSIVE
Modérée I	69 - 60	11 à 15	
Modérée II	59 - 50	16 à 20	REPETITIONS
Faible I	49 - 40	21 à 30	
Faible II	39 - 30	31 et plus	

Tableau -V- COMBINAISON DES REPETITIONS ET DES CHARGES
d'après MATVEIEV - 1983.

Selon MATVEEV (1983), lorsque la force est un élément important de la formation de l'athlète, deux méthodes sont utilisées :

a) méthode "extensive"

C'est la répétition d'exercices effectués aussi longtemps que possible avec une charge modérée.

La méthode extensive se justifie pour :

- . augmenter le diamètre musculaire
- . favoriser le développement de l'endurance de force (maintien d'un niveau de la force maximale le plus longtemps possible)
- . assurer la préparation de l'organisme à supporter des charges de plus en plus importantes.

Dans cette méthode, le nombre de répétitions dans les séries va de 7-8 à 10-15 selon que la charge représente 80 à 60 % de sa valeur maximale.

b) méthode "intensive"

Elle est basée sur le principe de la répétition de mouvements contre des charges élevées, elle intervient pour le développement de la force maximale.

Le travail est effectué contre des charges représentant 80-90 % à 95-97 % de la charge maximale.

c) organisation des séries

Les séries sont organisées en :

. stations :

[70 % (10x)] + [70 % (10x)] +
ou [50 % (10x)] + [60 % (10x)] +
ou [80 % (10x)] + [80 % (7x)] +

. pyramide (selon le principe de la charge croissante puis décroissante)
(figure -3-) :

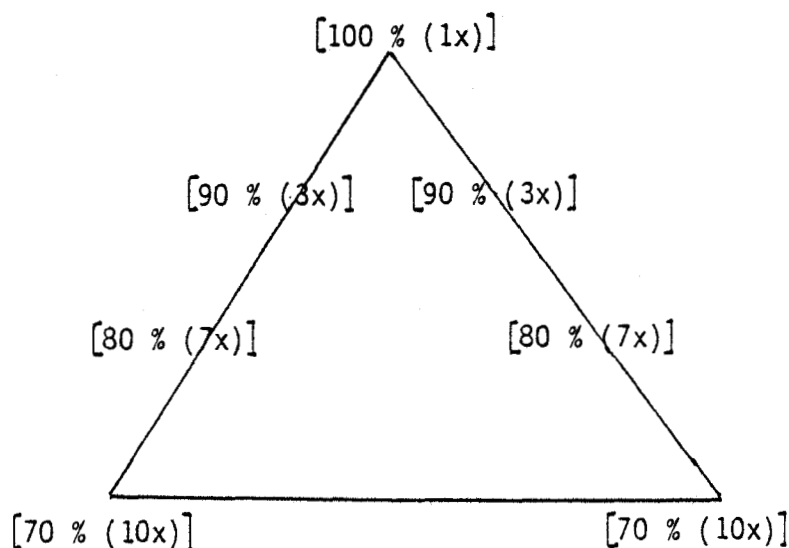


Figure -3- Exemple de pyramide d'entraînement de la force.

En résumé : les méthodes d'entraînement de la force maximale utilisent les charges supérieures à 80 % du maximum, celles de l'endurance de force les charges de 25 % à 40 % de la charge maximale, celles de la détente les charges qui permettent la vitesse d'exécution dans le régime plyométrique (ces charges sont souvent représentées par la masse corporelle du sportif).

B- EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT DE LA FORCE

1- Musculation et force musculaire

Les études sur l'entraînement portent d'abord sur les méthodes isométriques et concentriques. HETTINGER et MULLER (1953) préconisent l'entraînement isométrique ; pour RASCH et MOREHOUSE (1957) le travail concentrique est plus efficace. WARD et FISK (1964) montrent que l'entraînement dans un régime musculaire donne des résultats plus importants dans le test qui utilise le même régime de contraction. WARTENWEILER et coll (1971) confirment la spécificité de l'entraînement sur le gain de force. KOMI et BUSKIRK (1972) examinent les effets de l'entraînement concentrique et excentrique sur le développement de la force. Ils concluent à la supériorité de l'entraînement excentrique. Le gain de force y est plus important quelle que soit la modalité de contraction musculaire du contrôle. HÄKKINEN et KOMI (1981) montrent que l'entraînement mixte concentrique-excentrique est plus efficace que l'entraînement concentrique.

ZACIORSKI et RACJIN (1975), MATHIEU et VAN HOECKE (1983) mettent en relief la spécificité de l'angle de l'entraînement en condition de contraction isométrique. La spécificité est d'autant plus marquée que le muscle est entraîné en position raccourcie.

2- Entraînement de la force et vitesse de mouvement (figure -4-)

CAIOZZO et coll.(1981) entraînent des groupes à deux vitesses caractéristiques, l'une correspondant à la force maximale, l'autre à la puissance maximale. Il est montré que l'entraînement à vitesse faible permet d'améliorer sensiblement la force pour des valeurs faibles de la vitesse de mouvement. L'entraînement à vitesse plus élevée (qui détermine la puissance

maximale) conduit à une augmentation faible et uniforme de la force pour toutes les vitesses testées.

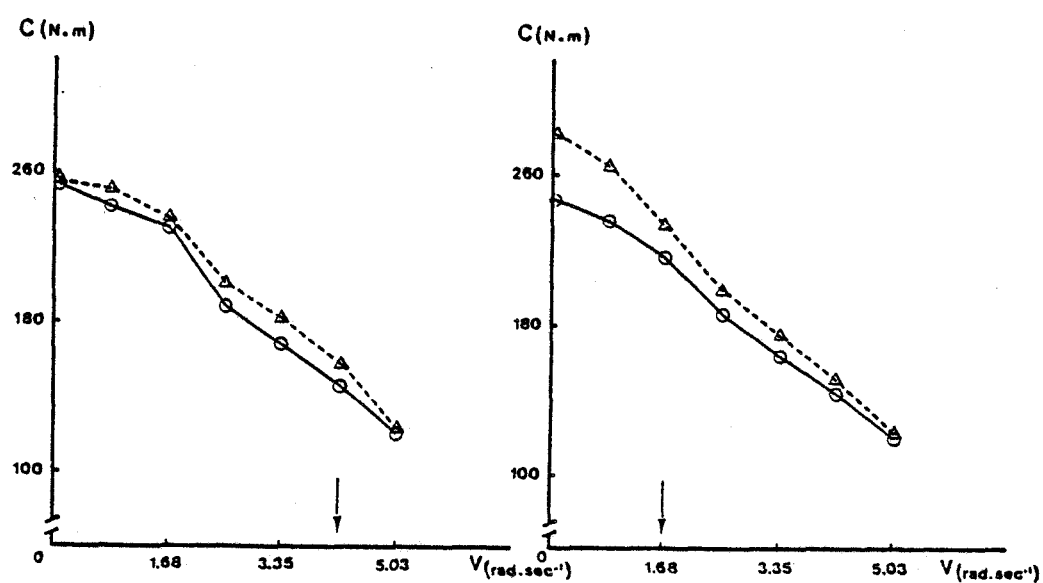


Figure -4- Relations Couple - Vitesse angulaire

d'après CAIOZZO et coll. - 1981.

VIITASALO et coll.(1982) testent la force maximale dynamique et isométrique, la puissance maximale et la vitesse de course sur 20 mètres après un entraînement de course au cours duquel le sujet est tiré par un entraîneur mécanique. Seule la vitesse de course est améliorée de façon significative.

3- Développement de la force et vitesse de raccourcissement

Si la littérature sur l'entraînement et le développement de la force est abondante, celle sur la vitesse de raccourcissement du muscle après une période d'entraînement est pauvre. Il est bien connu, CNOCKAERT (1976), que la relation qui lie la force et la vitesse de raccourcissement est caractéristique de la richesse des muscles en fibres rapides ou lentes (figure -5-). CNOCKAERT (1976), TIHANYI et coll (1982) trouvent des puissances plus élevées pour les muscles rapides.

Pour DUCHATEAU (1981), l'entraînement isométrique n'améliore pas la vitesse de raccourcissement.

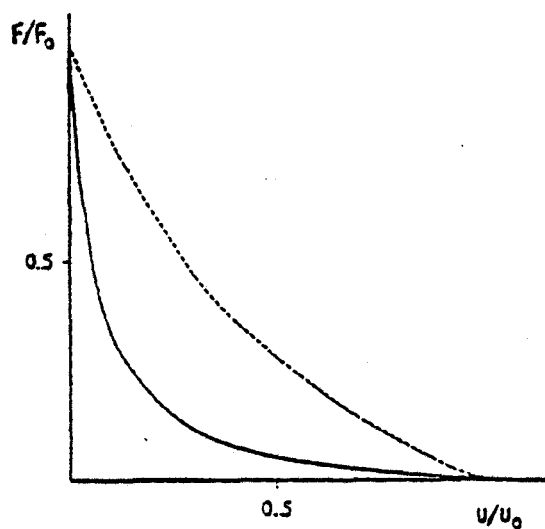


Figure -5a-

Relations force-vitesse instantanées normalisées du triceps et du fléchisseur équivalent d'un sujet.

(en trait plein, les relations du triceps - en trait pointillé, celles du fléchisseur équivalent)

d'après CNOCKAERT et PERTUZON - 1975.

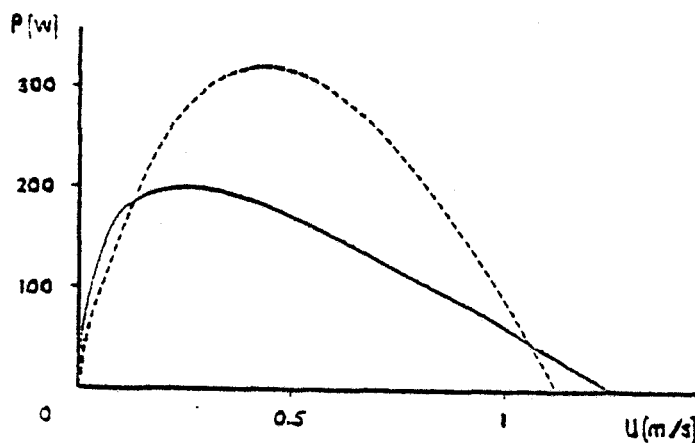


Figure -5b-

Relations puissance-vitesse instantanées du triceps et du fléchisseur équivalent d'un sujet.

(en trait plein, les relations du triceps - en trait pointillé, celles du fléchisseur équivalent)

d'après CNOCKAERT et PERTUZON - 1975.

4- Force et élasticité musculaire

THYS (1984) expose les aspects de l'utilisation de l'énergie élastique pour l'amélioration du rendement musculaire. L'amplitude de l'étirement préalable doit être réduite (CAVAGNA et coll.- 1972, THYS et coll.- 1975, BOSCO et KOMI - 1979). De plus, le délai entre l'étirement et le raccourcissement doit être le plus court possible (MARGARIA et coll.- 1963, CAVAGNA et col. - 1975, BOSCO et RUSKO - 1983). A la fin d'un étirement forcé, les caractéristiques élastiques et les propriétés de la composante contractile sont modifiées (CAVAGNA et CITTERIO - 1974).

Par ailleurs, pour LENSEL et VIGREUX (1982), la fatigue diminue la quantité d'énergie stockable en augmentant la compliance.

5- Entraînement et structure musculaire

Suite à l'entraînement, THORSTENSSON et coll.(1976-a) montrent que l'amélioration de la force est corrélée avec l'augmentation de l'activité de l'enzyme myokinase et avec l'augmentation du rapport de surface entre les fibres rapides et les fibres lentes. HOWALD (1982) suggère que l'entraînement de vitesse et de force ne jouerait que sur l'ultrastructure des fibres et leurs fonctions métaboliques, tandis que l'entraînement de longue durée pourrait transformer les fibres II (FT) en fibres lentes (ST).

Toutefois, ces études ne renseignent pas sur les transformations à long terme des propriétés mécaniques suite à un entraînement. DUCHATEAU (1981) montre que l'entraînement isométrique augmente le pic de puissance (52 %) dans une proportion plus importante que l'entraînement dynamique (19 %). En accord avec WARTENWEILER et coll.(1971), il précise que l'entraînement isométrique améliore la vitesse de raccourcissement pour des forces supérieures à 60 % de la force maximale. L'entraînement dynamique marque un gain pour des charges inférieures à 40 % de la force maximale.

De toutes ces études sur les propriétés mécaniques du muscle, il ressort que l'extrême variabilité des protocoles d'entraînement et des techniques de mesure des variables ne permet pas d'avoir une vue d'ensemble des phénomènes d'adaptation du muscle, suite à un entraînement de force.

On peut toutefois remarquer que l'augmentation de force est plus importante lorsque les répétitions sont peu nombreuses et les charges opposées au mouvement élevées, suivant en cela les constatations de ANDERSON et KEARNEY (1982), SCHMIDTBLEICHER et HARALAMBIE (1981).

La difficulté que l'on rencontre dans la comparaison des méthodes d'entraînement et de leurs effets résulte, pour une bonne part, dans un manque de définition stricte des propriétés musculaires qui sont testées. Il est donc souhaité, pour plus de rigueur, de se référer à un modèle conceptuel du muscle squelettique.

III- PROPRIETES MECANQUES DU MUSCLE

GASSER et HILL (1924), LEVIN et WYNAM (1927) proposent un modèle visco-élastique composé de deux composantes élastiques en série, l'une amortie, l'autre non amortie. HILL (1938) après les travaux de FENN et MARSH (1935) construit un modèle à deux composantes (figure -6-).

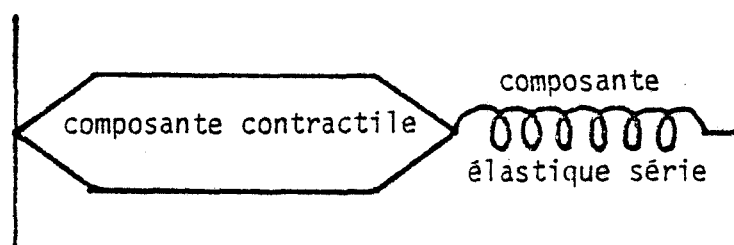


Figure -6- Modèle de muscle à deux composantes d'après HILL - 1938.

Ce modèle associe en série une composante contractile (CC) et une composante élastique (CES). Ce modèle évolue en introduisant une composante élastique parallèle (CEP) (HILL - 1951 et JEWELL-WILKIE - 1958).

Quelles que soient les nuances apportées par la suite dans la représentation de ce modèle (WONG - 1971) et les théories développées sur le muscle (HUXLEY - 1952), le modèle opérationnel le plus simple reste celui de HILL (modèle à deux composantes).

Le modèle à deux composantes de HILL s'adapte à l'étude des propriétés du muscle in situ, il sera donc choisi pour notre travail. Il permet notamment l'étude des relations FORCE - LONGUEUR et FORCE - VITESSE par sa composante contractile et COMPLIANCE - FORCE par sa composante élastique série.

A- RELATION FORCE - LONGUEUR (F-L)

In situ, cette relation n'est pas étudiée directement, elle est établie d'après la relation couple-angle. Les travaux de ELKINS et coll. (1951), PERTUZON (1972) dans un plan horizontal, BANKOV et JORGENSEN (1969) dans un plan horizontal ou vertical, montrent que cette relation est une courbe à maximum. Pour le coude, cet angle est atteint en général à 90°. En ce qui concerne la relation F-L (figure -7-) PERTUZON (1972) décrit une relation d'allure sigmoïde pour le biceps brachii, pris en tant que fléchisseur équivalent de l'articulation du coude (la notion de muscle équivalent sera étudiée ultérieurement).

La grande variabilité de la forme des relations s'expliquerait par la richesse du muscle considéré en structures élastiques parallèles (MARECHAL et CASTEELS - 1976).

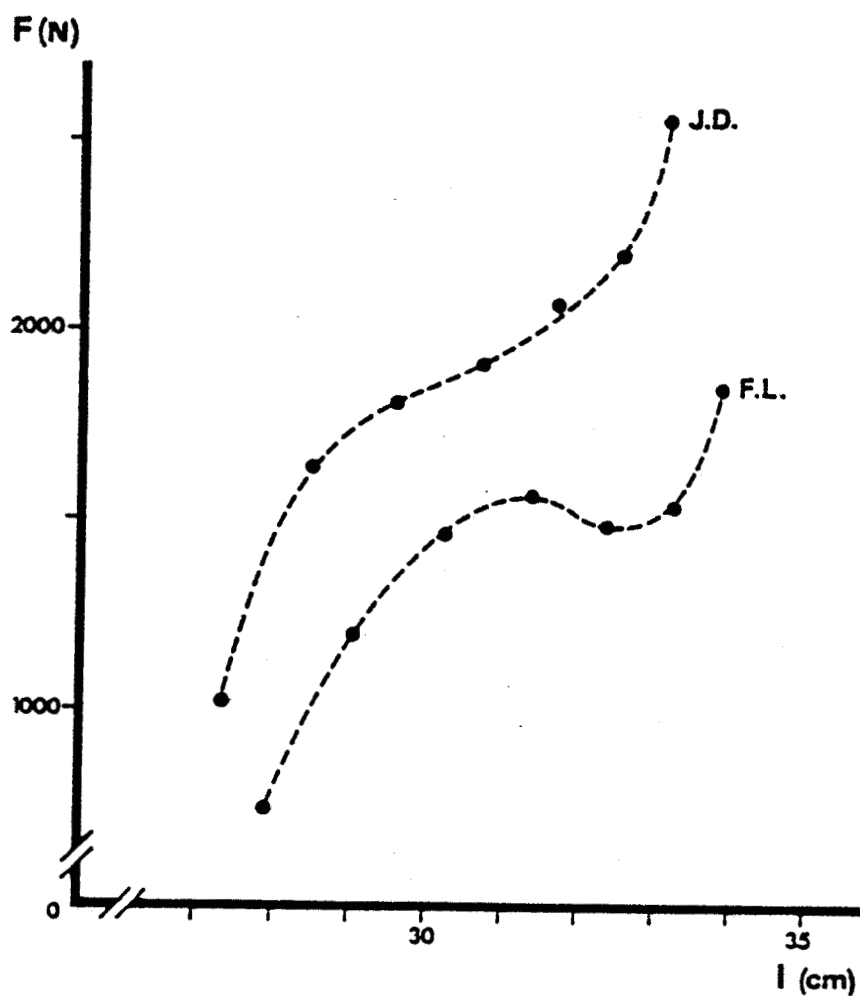


Figure -7- Relation entre la force isométrique du fléchisseur équivalent (F) et sa longueur (l) mesurées sur deux sujets (J.D. et F.L.)

Chaque point représente la moyenne des forces mesurées à longueur croissante et à longueur décroissante du fléchisseur équivalent.

(d'après PERTUZON - 1972).

B- RELATION FORCE - VITESSE (F-V)

HILL (1922) et LUPTON (1922) sur l'homme, GASSER et HILL (1924), LEVIN et WYMAN (1927) sur l'animal ont été parmi les premiers à s'intéresser à cette relation. Ils montrent que la force de contraction du muscle décroît lorsque la vitesse de raccourcissement augmente. La vitesse de raccourcissement maximale est obtenue pour une force nulle et dans le cas d'une contraction concentrique, la force maximale est obtenue pour une vitesse nulle.

HILL en 1938 propose une "équation caractéristique" qui décrit cette relation :

$$(F + a) (V + b) = (F_0 + a) b = c \quad (1)$$

où F_0 représente la force de contraction isométrique maximale, F la force de contraction du muscle, V la vitesse de raccourcissement du muscle, a et b sont des coefficients qui ont une valeur de force pour a et de vitesse pour b . Le terme $(F_0 + a) b$ est donc constant et la relation est une branche d'hyperbole.

Chez l'homme, la relation F-V est étudiée en associant la force de contraction à la vitesse angulaire du mouvement (HILL - 1922, FENN et coll. - 1931, FENN - 1938, DERN et coll. - 1947, BIGLAND et LIPPOLD - 1954).

PERTUZON (1972) montre que la relation F-V est une relation instantanée du muscle à condition que le niveau d'excitation soit constant. Dans ces conditions, WILKIE (1950), PERTUZON (1972) (figure -8-), CNOCKAERT (1976) montrent que la relation force-vitesse peut être décrite par une fonction hyperbolique du type de celle proposée par HILL.

D'après l'équation de HILL (1938), le maximum de puissance est obtenu pour :

$$\frac{F}{a} = \frac{V}{b} = \left(1 + \frac{F_0}{a}\right)^{0.5} - 1.$$

De cette équation on obtiendra les valeurs de F et V correspondant à la puissance maximale.

De l'équation (1) on calcule les valeurs de F_0 , V_0 et on en déduit le coefficient $\frac{a}{F_0}$.

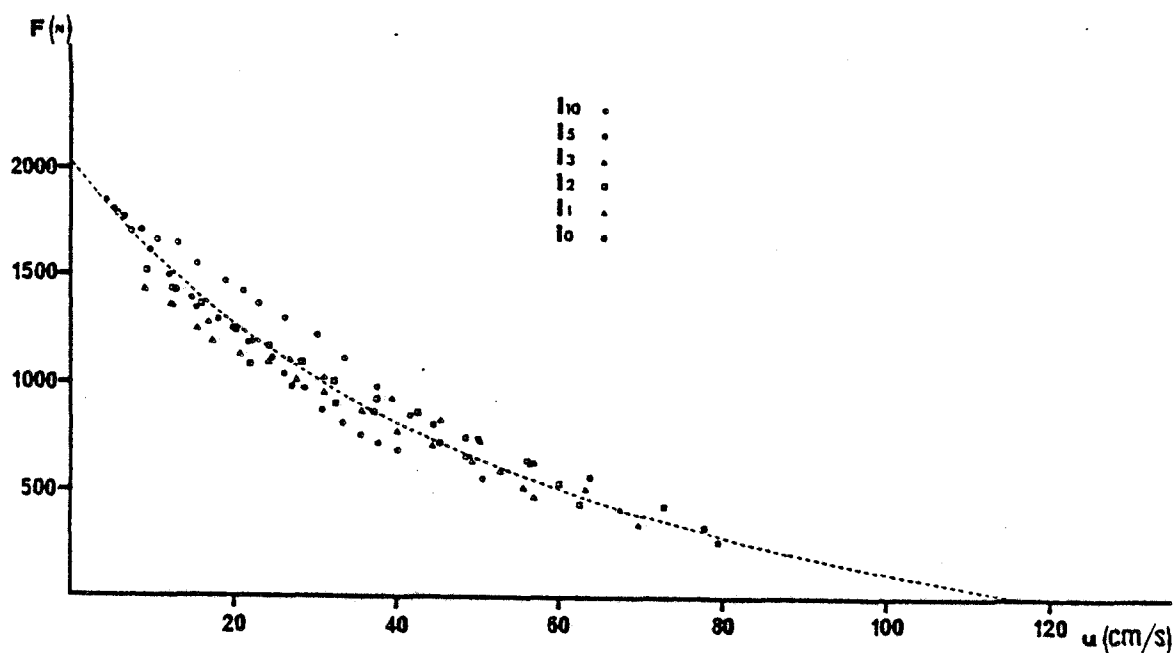


Figure -8- Relation entre les valeurs instantanées de la force (F) et de la vitesse (u) de raccourcissement du fléchisseur équivalent au cours du mouvement maximal de flexion du coude, dans six conditions d'inertie.

Les points correspondent à six mouvements exécutés par le sujet F.L. (d'après PERTUZON - 1972).

C- RELATION COMPLIANCE - FORCE (K-F)

La composante élastique série est un élément qui assure essentiellement la liaison entre la composante contractile et la périphérie (GOUBEL, VANHOECKE - 1982). Dans certaines conditions (MARGARIA et coll.- 1963, BOSCO et RUSKO - 1983), la CES restitue l'énergie stockée pendant la phase d'étirement consécutive à la mise sous tension de la CC. Elle contribue ainsi à améliorer la performance du muscle en produisant une puissance instantanée plus importante (THYS et coll.- 1972, THYS - 1973) ou en économisant l'énergie lors de contractions sous-maximales (CNOCKAERT - 1972, THYS - 1974).

La compliance K, mesure le degré d'extensibilité et s'exprime par le rapport $\frac{\Delta l}{\Delta F}$ où l est la longueur du muscle et F la force.

De nombreuses techniques permettent d'explorer la CES, parmi lesquelles on trouve :

- une méthode par réduction de la charge imposée ou de force imposée (WILKIE - 1956, JEWELL et WILKIE - 1958, BAHLER - 1967, PARMLEY et SONNENBLICK - 1967, GOUBEL et PERTUZON - 1973), c'est la technique de QUICK-RELEASE.
- une méthode par le raccourcissement du muscle, d'une certaine valeur (HILL - 1950 - 1953, AKAZAWA et coll. - 1969, HUXLEY et SIMMONS - 1970, BLANGE et coll. - 1972), c'est le CONTROLLED-RELEASE.

Chez l'homme, in situ, l'étude de la CES est réalisée par une méthode apparentée à celle de QUICK-RELEASE qui associe la valeur de la compliance à celle de la force au moment de la mesure.

Comme le montre la figure -9- la forme des relations obtenues peut dépendre des méthodes de mesure, mais la valeur de la compliance diminue toujours lorsque la force croît. La compliance aurait tendance à devenir constante à un certain niveau de force (CLOSE - 1972, GOUBEL - 1978).

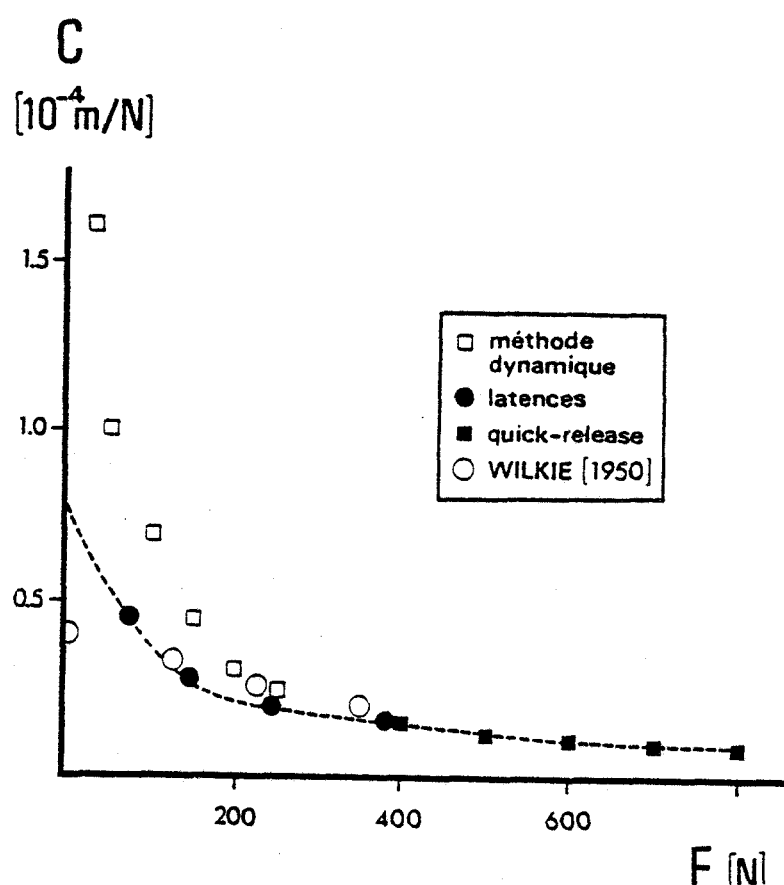


Figure -9- Relation compliance-force du fléchisseur équivalent
(ensemble des résultats)

Chaque point représente une valeur moyenne calculée à partir des résultats obtenus sur l'ensemble des sujets.

La courbe tracée est celle calculée à partir des points expérimentaux correspondant à la méthode des latences et à la méthode du quick-release.

(d'après GOUBEL - 1974).

IV- OBJET DE L'ETUDE

A- CHOIX DU THEME

La réalisation des gestes est toujours complexe et fait intervenir les différentes modalités de la contraction musculaire présentées dans le tableau -I-. Pour une meilleure compréhension des modifications des performances, il apparaît préférable d'étudier l'ensemble des propriétés mécaniques du muscle et leurs modifications, suite à des entraînements différents, dans le but de rechercher les effets spécifiques de chacun d'entre eux.

Il sera alors possible de mieux choisir les méthodes d'entraînement de la force en relation avec la pratique sportive, ou l'ordre dans lequel il faut envisager d'utiliser ces méthodes, ou encore d'émettre des hypothèses sur l'utilisation combinée de différentes méthodes.

Les entraînements sont réalisés de façon strictement isométrique, concentrique ou excentrique et l'on teste leurs effets sur :

les relations COUPLE - ANGLE

FORCE - VITESSE DE RACCOURCISSEMENT

COMPLIANCE - FORCE

les variations de l'E.M.G.

les vitesses de contraction musculaire

le délai des réponses mécaniques.

B- CHOIX DE LA PREPARATION

1- Etude des variables biomécaniques

WILKIE (1950) définit un certain nombre de critères qui permettent les études quantitatives de la fonction musculaire :

- le mouvement doit concerner une articulation dont la géométrie est simple
- peu de muscles doivent être mis en jeu dans le mouvement
- le mouvement ne doit pas perturber la fixité du reste du corps
- le mouvement doit pouvoir être reproductible aussi précisément que possible

- le mouvement doit être unidirectionnel
- au cas où une articulation présente plusieurs degrés de liberté, il convient d'en réduire le nombre et de n'en étudier qu'un seul.

Le mouvement de flexion de l'avant-bras sur le bras, main en pronosupination, répondant à ces critères, sera choisi pour étudier les propriétés mécaniques du muscle.

2- Choix des muscles et notion de fléchisseur équivalent (figure -10-)

Dans un mouvement qui nécessite la mise en jeu de plusieurs muscles, ou d'un muscle ayant plusieurs chefs, chaque muscle développe une force. La force développée, mesurée au niveau du segment déplacé, est la résultante des forces musculaires individuelles. L'étude de l'activité musculaire, dans un mouvement choisi, devra être faite par rapport à un muscle que l'on aura déterminé comme étant le plus représentatif du mouvement étudié.

Ce muscle est appelé "muscle équivalent" (BOUISSET - 1973).

Le biceps, courte portion, pourra être considéré comme fléchisseur équivalent. Le niveau d'activité du fléchisseur équivalent sera calculé comme étant la somme des électromyogrammes intégrés (Q) des deux fléchisseurs les plus importants, accessibles par électromyographie de surface :

BICEPS BRACHII

BRACHIO RADIALIS.

Le brachialis, muscle profond ne pourra pas être étudié, le pronator teres et l'extensor carpi longus sont négligés en raison des dimensions très modestes qu'ils représentent par rapport aux trois fléchisseurs principaux.

3- Angle d'équilibre

Les études sont réalisées en référence à un angle articulaire standard pour lequel les forces élastiques passives des agonistes et des antagonistes s'équilibrent sur l'articulation. Cette position de référence, appelée angle d'équilibre, est de 75° pour l'articulation du coude (PERTUZON et LESTIENNE - 1973).

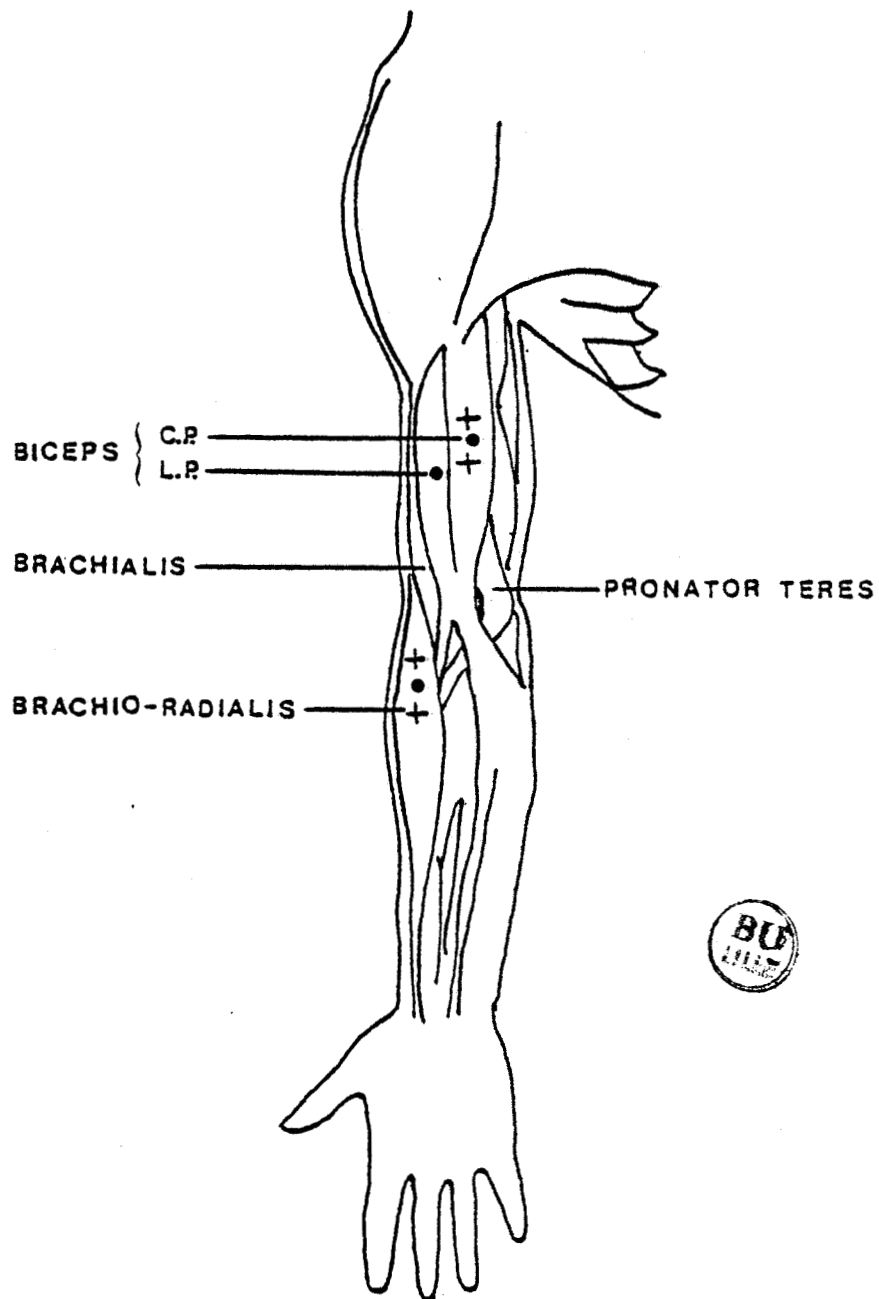


Figure -10- Fléchisseurs de l'avant-bras sur le bras.

(T. VON LANZ et WACHSMUTH - 1959)

- points moteurs
- + emplacement des électrodes

4- Contrôle électromyographique

L'activité électrique du muscle traduit le niveau de commande nerveuse. La détection de l'activité électrique (E.M.G.) est faite au moyen d'électrodes de surface. Les E.M.G. ainsi recueillis peuvent être considérés comme représentatifs de l'activité des muscles détectée par méthode intramusculaire (MATON - 1975). La distance inter-électrodes, 3 cm, et la position des électrodes parallèlement aux fibres musculaires respectent les principes décrits notamment par VIGREUX (1977).

Le brachio radialis et le biceps brachii sont les fléchisseurs examinés (figure -10-), la longue portion du triceps (figure -11-) en tant qu'extenseur équivalent (CNOCKAERT - 1976, POULAIN - 1981) est également détectée.

En résumé, l'étude porte sur le mouvement volontaire de flexion du coude. Nous allons étudier les adaptations à l'entraînement des composantes contractile et élastique série du muscle, selon le modèle à deux composantes de HILL - 1938.

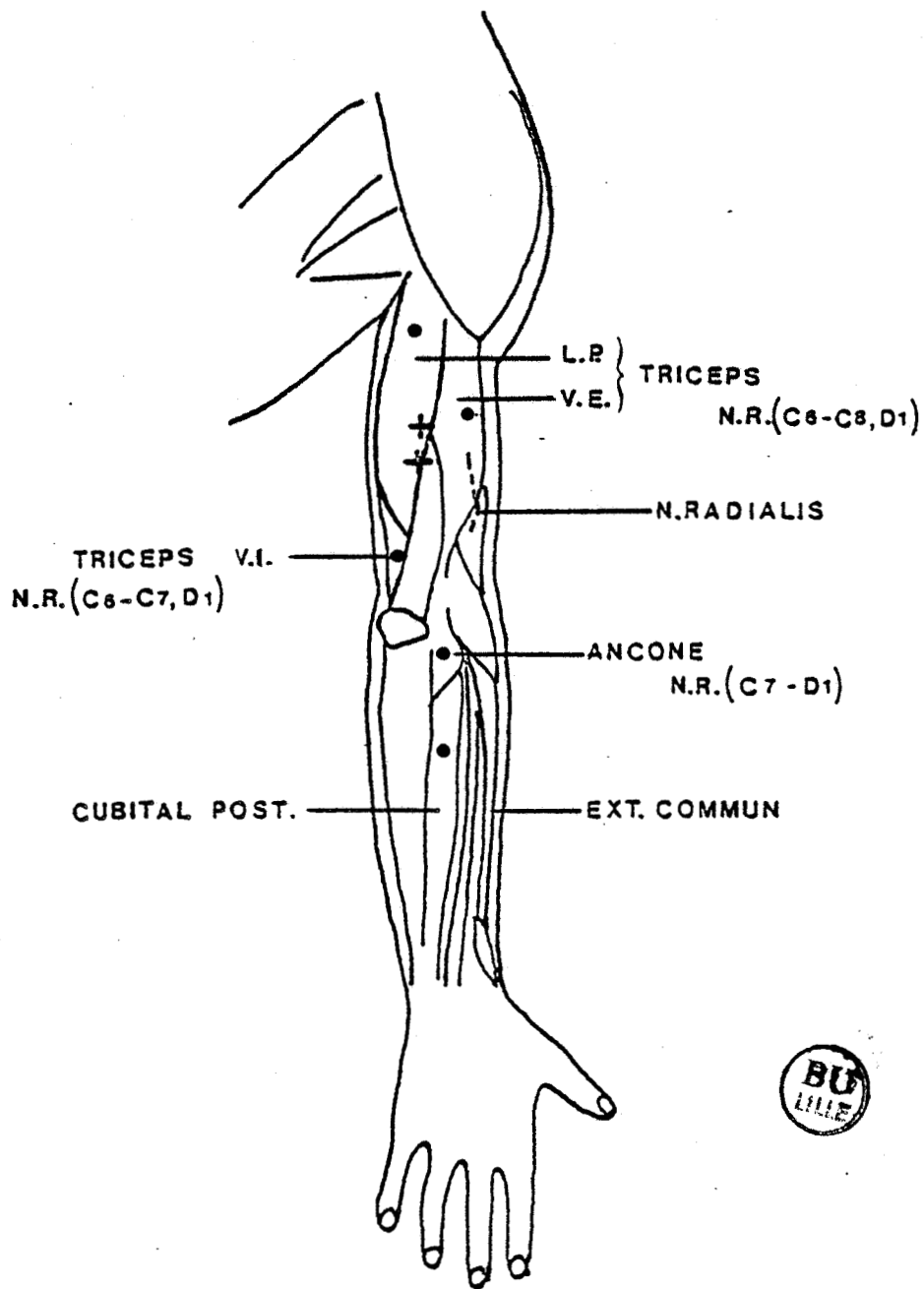


Figure -11- Extenseurs de l'avant-bras sur le bras.

(T. VON LANZ et WACHSMUTH - 1959)

- représente les points moteurs
 - + l'emplacement des électrodes de détection d'EMG
- Sont figurées les origines des nerfs des différentes branches du N. radialis dans les parenthèses.

TECHNIQUES

=====

ET

PROTOCOLES

=====

I- <u>TECHNIQUES</u>	33
A- <u>DISPOSITIF ERGOMETRIQUE</u>	33
1- Le bâti et le siège	33
2- Equipage mobile	35
3- Dispositifs annexes	35
4- Dispositif de sécurité	35
B- <u>DETECTION DES VARIABLES CINEMATIQUES</u>	35
1- Déplacement angulaire	35
2- Vitesse angulaire	37
3- Accélération angulaire	37
C- <u>DETERMINATION DES VARIABLES MECANIQUES MUSCULAIRES</u>	37
D- <u>MESURE DE L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE</u>	38
1- Détection et amplification de l'activité myoélectrique	38
2- Quantification de l'activité myoélectrique	39
E- <u>TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT</u>	40
F- <u>DETERMINATION DES VARIABLES CINEMATIQUES</u>	40
1- Inerties	40
2- Déplacement	41
3- Vitesse	42
4- Accélération	42
5- Couple	42
G- <u>METHODES DE CALCUL</u>	43
1- Longueur du muscle	43
2- Force musculaire	43
3- Vitesse	45
4- Compliance série	45

II- <u>PROTOCOLES</u>	47
A- <u>CHOIX DES SUJETS</u>	47
B- <u>DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION</u>	49
1- Schéma d'organisation générale	49
2- Organisation d'une séance d'entraînement	49
3- Etude des variables musculaires	52
C- <u>RELEVÉ DES VARIABLES BIOMÉCANIQUES</u>	53
1- EMG _i - couple isométrique	53
2- Mouvements de Quick-Release	53
3- Mouvements volontaires anisométriques	54
4- Contraction volontaire isométrique	54
5- Réglages annexes.	55

I- TECHNIQUES

Le dispositif expérimental a été conçu de façon à pouvoir assurer une bonne reproductibilité des mouvements. Il possède de nombreux réglages qui permettent aux sujets de réaliser les mouvements dans les conditions identiques. De plus, les mouvements étant maximaux, il a fallu prévoir un dispositif de sécurité.

A- DISPOSITIF ERGOMETRIQUE

Inspiré des dispositifs réalisés par BOUISSET et DENIMAL (1964), CNOCKAERT (1968), il a été conçu et réalisé par CNOCKAERT et PERTUZON. Ce dispositif est conçu de manière à permettre au sujet, la réalisation de mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras dans un plan horizontal. Aucune force extérieure ne doit faciliter le mouvement ni le contrarier. Il faudra également pouvoir contrôler le nombre de degrés de liberté du mouvement étudié.

Le dispositif est constitué d'un bâti supportant un équipement mobile. Un siège est annexé au bâti. A l'équipage mobile, sont adjoints des dispositifs annexes permettant de faire varier les conditions du mouvement.

1- Le bâti et le siège (figure -12-)

Le bâti est constitué par deux colonnes verticales (1), scellées au sol par des embases (2) dont l'une supporte l'équipage mobile (6). Les deux colonnes sont reliées par deux entretoises horizontales (3), maintenues par deux étais obliques (4) allant de leur sommet à une embase commune (5). Le dispositif d'arrimage au sol interdit toute déformation et réduit les vibrations.

Le siège réglable en hauteur, latéralement et dans le sens antéro-postérieur, permet de positionner le sujet par rapport à l'équipage mobile de telle façon que bras, avant-bras et épaule soient dans un même plan horizontal et que les axes de rotation du coude et de l'équipage mobile soient alignés.

Afin d'assurer une bonne reproductibilité du mouvement, une sangle (9) fixe le tronc au dossier du siège, une épaulière (10) interdit tout mouvement de l'épaule, un appui (11) complète l'asujettissement du sujet au siège.

2- Equipage mobile (figure -13-)

Il se compose d'une attelle (1) moulée aux formes de l'avant-bras en position de semi-pronation. Cette attelle est placée sur une glissière (2) qui permet de mettre en coïncidence l'axe de rotation du système mobile et l'axe de rotation de l'articulation du coude.

3- Dispositifs annexes (figure -13-)

Une poulie (4) graduée permet de régler l'équipage mobile à l'angulation désirée. Annexé à l'axe vertical, un axe horizontal (5) permet de placer des masses additionnelles.

Un goniomètre (6) mesure les déplacements angulaires (θ).

Un accéléromètre tangentiel (7) mesure l'accélération du mouvement à une distance de 0,20 m de l'axe de rotation (θ'').

Une barre métallique déformable, équipée d'un électro-aimant (figure -12- (13)) et de quatre jauges de contraintes (figure -12- (15)) reliées à un pont de mesure permet de mesurer la valeur des couples pour les contractions isométriques d'après un dispositif étudié par LENSEL (1973).

4- Dispositif de sécurité (figures -12-, -16-)

Une butée vient amortir les masses en fin de mouvement (120°). Cette butée protège l'articulation du coude contre un choc violent et permet de limiter l'appréhension du sujet dans les exercices dynamiques volontaires.

B- DETECTION DES VARIABLES CINEMATIQUES

1- Déplacement angulaire

Il est étudié à l'aide du potentiomètre goniométrique (figure -13-(6)) dont l'axe de rotation est couplé à celui du dispositif de reproduction du mouvement. Ce potentiomètre est à réponse linéaire et délivre une tension électrique proportionnelle à la valeur de l'angle.

Les mesures sont effectuées par rapport à une position de référence définie par la position d'extension complète de l'avant-bras sur le bras.

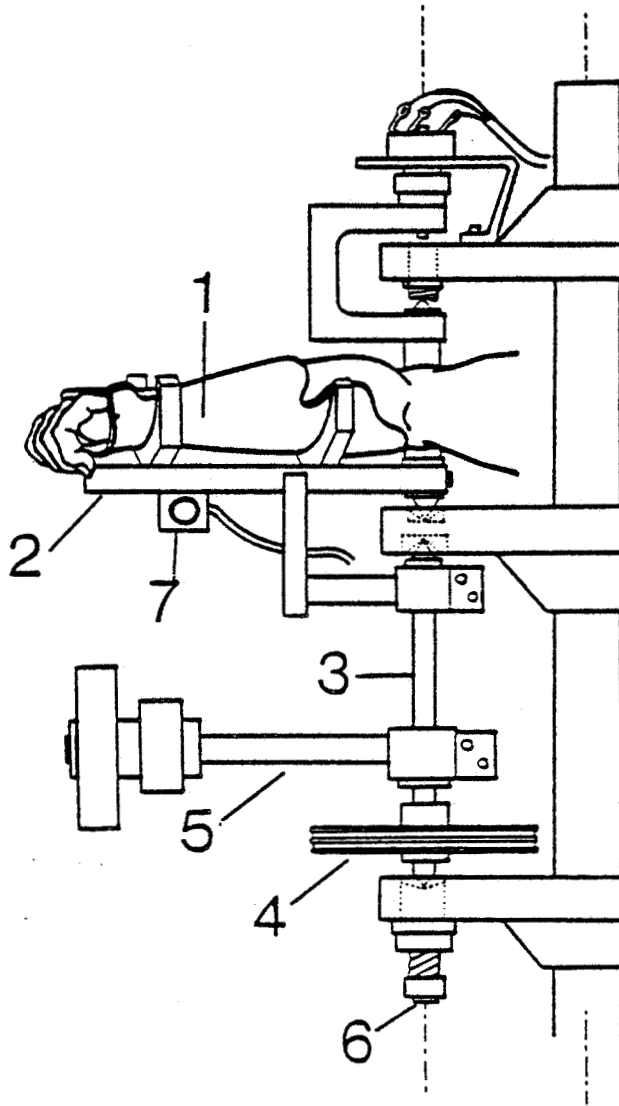


Figure -13- Equipement mobile : vue de profil
(d'après PERTUZON - 1972).

Les valeurs angulaires ainsi mesurées sont désignées par le symbole θ et sont étalonnées en utilisant la poulie graduée (figure -13-(4)) fixée sur l'axe de rotation du système de reproduction du mouvement.

2- Vitesse angulaire (θ')

Elle est obtenue par différenciation du signal potentiométrique.

Le calcul de θ' se fait numériquement par dérivation du déplacement angulaire, en échantillonnant toutes les 8 msec, à l'aide d'un ordinateur PDP 11.

3- Accélération angulaire

L'accélération est mesurée grâce à un capteur accélérométrique à inertie ACB. C'est un accéléromètre à variation de mutuelle inductance.

Les valeurs ainsi détectées sont des accélérations tangentielles, donc linéaires, qu'il suffit de diviser par la distance de l'accéléromètre à l'axe de rotation (0,20 m) pour obtenir l'accélération angulaire que l'on désigne par le symbole θ'' .

Ce capteur est étalonné en le soumettant à l'action de la pesanteur (+ $1g$, - $1g$).

C- DETERMINATION DES VARIABLES MECANIQUES MUSCULAIRES

Les mouvements de flexion de l'avant-bras sur le bras font intervenir 5 fléchisseurs. Pour les raisons expliquées précédemment, les fléchisseurs seront assimilés à un fléchisseur unique, équivalent, qui a les dimensions de la courte portion du biceps.

On tiendra compte de la longue portion du triceps en tant qu'extenseur équivalent.

Ce muscle, antagoniste, de la flexion est étudié pour s'assurer de la non-participation des freinateurs dans le mouvement de flexion.

D- MESURE DE L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE

1- Détection et amplification de l'activité myoélectrique

Les électromyogrammes de surface ont été détectés et enregistrés pour trois des muscles croisant l'articulation du coude :

- la longue portion du triceps en tant qu'extenseur équivalent
- le biceps fléchisseur localisé dans le bras
- le brachio-radialis fléchisseur localisé dans l'avant-bras.

Les électrodes utilisées sont des électrodes de surface BECKMAN ; elles sont constituées d'une cupule en matière plastique au fond de laquelle est insérée une pastille métallique (argent chloruré). La cupule est remplie de pâte conductrice et est fixée à la peau par des collerettes adhésives. La détection est bipolaire.

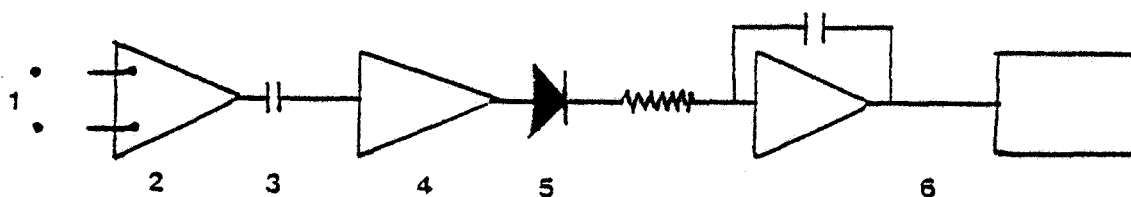
Pour un même muscle et pour obtenir l'activité électrique maximale, les électrodes sont distantes de 3 cm environ et en dérivation longitudinale (VIGREUX - 1977).

Préalablement à la pose des électrodes, on élimine la couche cornée de l'épiderme par abrasion de la peau au moyen de pierre ponce, puis on effectue un dégraissage à l'aide d'un mélange éther-alcool. On obtient une résistance interélectrode comprise entre 300 et 1000 Ω

La localisation des électrodes étant (figures -10-11-) :

- . au milieu de la longue portion du triceps qui est toujours active (TRAVILL - 1962)
- . au niveau du corps charnu de la courte portion du biceps
- . près de l'insertion humérale du brachio-radialis.

Le sujet est mis à la masse au moyen d'une électrode fixée au poignet gauche. Cette électrode est constituée d'une plaque d'argent garnie de pâte conductrice.



Les signaux recueillis par les électrodes (1) sont dirigés vers l'entrée d'un préamplificateur (2) dont l'impédance d'entrée est de $20\text{ M}\Omega$

Ce préamplificateur de gain 1 est suivi d'un condensateur (3) qui élimine les basses fréquences. Les signaux sont ensuite amplifiés (4) et intégrés (6). La diode (5) permet de redresser le signal.

2- Quantification de l'activité myoélectrique

La quantification des électromyogrammes de surface est réalisée par intégration continue du signal. Après redressement équipotentiel à deux alternances, le signal analogique fourni est converti en signal digital (FEUER - 1967). Celui-ci est enregistré sous forme d'impulsions dont le nombre est proportionnel à la surface comprise entre le tracé électromyographique et la ligne du zéro électrique. Ces impulsions "pips" sont désignées par le symbole Q.

Il suffit alors de compter les "pips" pendant la phase motrice qui intéresse l'expérimentation. On obtient une appréciation globale de la quantité d'électricité débitée par le muscle au cours du mouvement ("valeur temporelle", BOUISSET - 1973).

a) Choix d'une unité d'expression de Q

TARDIEU et coll. (1963) ont montré que : "chez l'homme normal, la quantité d'électricité recueillie sur le biceps est suffisamment constante au cours d'une même séance lorsque le sujet porte un poids donné. Cette quantité varie plus notablement d'un jour à l'autre, les conditions paraissant par ailleurs identiques".

Il nous faut donc exprimer le nombre de pips en unité arbitraire, ce qui permettra la comparaison entre plusieurs expérimentations chez un même sujet et entre des sujets différents. Cette unité est le *kilo-statique-seconde* (BOUISSET - 1973).

Toutes les épreuves d'étalonnage seront effectuées avec l'avant-bras et le bras faisant un angle de 75° , qui est l'angle moyen auquel les études ont été réalisées. Ceci assure une longueur déterminée du muscle étudié et garantit l'utilisation de l'unité arbitraire définie par BOUISSET.

L'utilisation d'un tel coefficient ne peut servir qu'à un calibrage, étant donné les conditions différentes du travail statique et du travail dynamique.

E- TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT

Toutes les données précédemment décrites sont enregistrées sur papier au moyen d'un enregistreur à encre : MINGOGRAPH 800.

Système d'enregistrement :

Huit pistes d'enregistrement. L'encre sous pression passe dans un capillaire (100μ de $\emptyset$) lui-même solidaire d'un galvanomètre dont la déviation est proportionnelle à la différence de potentiel qui lui est appliquée. La vitesse de défilement du papier est réglable de 2,5 mm/sec. à 1 m/sec. Nous avons choisi la vitesse de $250 \text{ mm} \times \text{sec}^{-1}$ pour les mouvements dynamiques de notre expérimentation, et $100 \text{ mm} \times \text{sec}^{-1}$ pour les mouvements statiques.

Le schéma général des dispositifs de mesure est donné dans la figure -10-.

F- DETERMINATION DES VARIABLES CINEMATIQUES

1- Inerties

Pour les mouvements anisométriques, les valeurs des inerties additionnelles opposées au déplacement sont présentées au tableau -VI-.

Pour I_0 , qui représente l'appareillage à vide cette inertie est calculée par une méthode d'oscillation (GERBEAUX et coll. - 1981).

Les autres inerties sont appliquées (figure -13-(6)) à 0,317 m de l'axe. Elles ont pour valeur $I_0 + M_{kg} \times R_m^2$.

I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_{QR}
0,0768	0,2036	0,4081	0,6117	1,1194	0,1061

Tableau -VI- VALEURS DES INERTIES OPPOSEES AU DEPLACEMENT.

A ces valeurs, il faut ajouter l'inertie de l'avant-bras + main qui est calculée en tenant compte des données anthropométriques des sujets, selon une formule proposée par CNOCKAERT (1976).

$$I_{MAB} = 44 \times 10^{-4} M \times L^2$$

ou I_{MAB} est exprimé en $m^2 \times kg$

M = Masse corporelle en kg

L = Longueur de l'avant-bras plus la main, en mètre. Cette longueur est mesurée entre le bord inférieur de l'épicondyle externe de l'humérus et l'extrémité du médus de la main tendue, bras et avant-bras sont dans le prolongement l'un de l'autre.

2- Déplacement (θ)

Le déplacement θ est mesuré toutes les 8 msec à partir du moment où la force est maximale. L'équation du déplacement est obtenue par une méthode de lissage par les moindres carrés proposée par ROUSSEAU et coll. (1981).

Les calculs sont faits avec 4 points de lissage.

3- Vitesse (θ')

La vitesse angulaire est calculée point par point, toutes les 8 msec en calculant la dérivée de l'équation du déplacement.

Le tracé de la vitesse angulaire permet de ne retenir que la partie du mouvement dont la vitesse est croissante.

4- Accélération (θ'')

Elle est mesurée toutes les 8 msec, à partir du moment où la force est maximale, jusqu'au moment où la vitesse est maximale.

L'équation du tracé de l'accélération est calculée par la méthode de lissage proposée ci-dessus. On a pris 3 points de lissage.

5- Couple

Il est mesuré par l'amplitude d'une déviation enregistrée, en référence à un étalonnage établi pour des masses de 0 à 30 kg. Le calibrage est fait en moyennant les résultats de deux séries réalisées l'une en présentant les charges de façon croissante, l'autre de façon décroissante.

Les masses sont reliées à la poulie de l'ensemble mobile (figure -13-(4)) par un câble qui passe par l'une des poulies de renvoi (figure -12-(12)).

Les masses et leur valeur de couple exprimé en $N \times m$ sont rassemblées dans le tableau -VII-.

M en kg	0	5	10	15	20	25	30
$C_N \times m$	0	4,905	9,81	14,715	19,620	24,525	29,430

Tableau -VII- VALEUR DES MASSES ET COUPLES.

G- METHODES DE CALCUL

Les variables cinématiques du mouvement (θ , θ' , θ'') sont rapportées aux dimensions du fléchisseur équivalent et sont ainsi transformées à partir de relations trigonométriques simples en longueur, vitesse de raccourcissement et force musculaire (PERTUZON - 1972) (figures -14-15-).

1- Longueur du muscle

Bras, avant-bras et fléchisseur équivalent sont assimilés à un triangle déformable dont il suffit de connaître deux côtés et l'angle adjacent externe pour calculer la longueur du 3eme côté.

$$\text{ainsi } l = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cdot \cos \theta}$$

PERTUZON et BOUISSET (1971) ont calculé les valeurs de a et b par rapport à la longueur de l'avant-bras (d), mesuré entre l'axe épitrochlée-épicondyle et l'apophyse styloïde radiale.

$$\text{soit } a = 0,18 \times d \quad b = 1,17 \times d$$

Ces valeurs sont comparables à celles déterminées par WILKIE (1950) à partir de clichés radiographiques et par BRAUNE et FISCHER (1889) à partir de mesures faites sur le cadavre.

2- Force musculaire (F)

- En condition anisométrique (figure -14-), F est calculée à partir de l'accélération angulaire.

$$F = I \times \theta'' \frac{l}{ab \cdot \sin \theta}$$

- où
- F, la force du fléchisseur équivalent est en Newton
 - I, l'inertie totale opposée au déplacement en $m^2 \times kg$
 - θ'' est l'accélération angulaire en $rad \times sec^{-2}$
 - l est la longueur du fléchisseur pour l'angle considéré θ

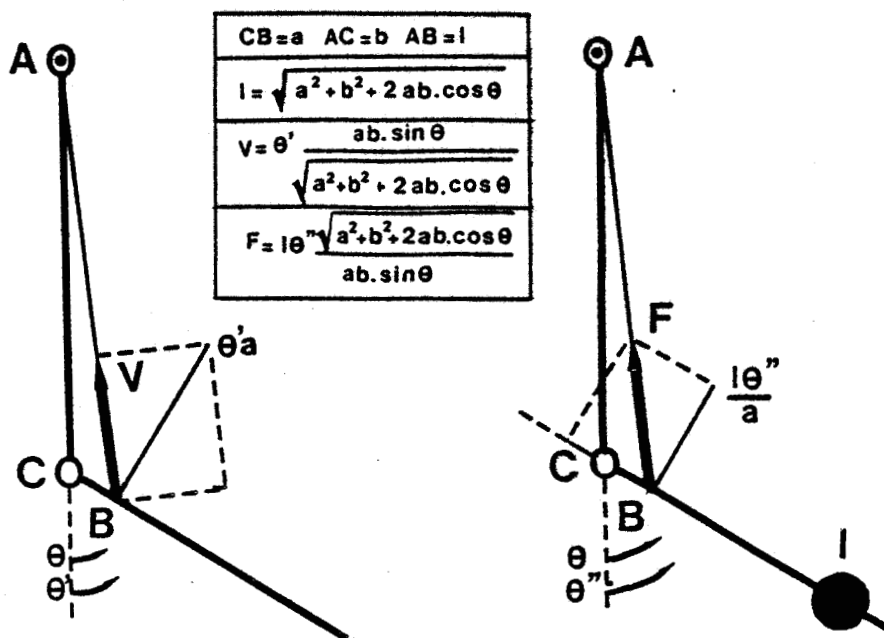


Figure -14- Schémas de calcul de la longueur, de la vitesse et de la force du fléchisseur équivalent en contraction anisométrique, d'après PERTUZON - 1972.

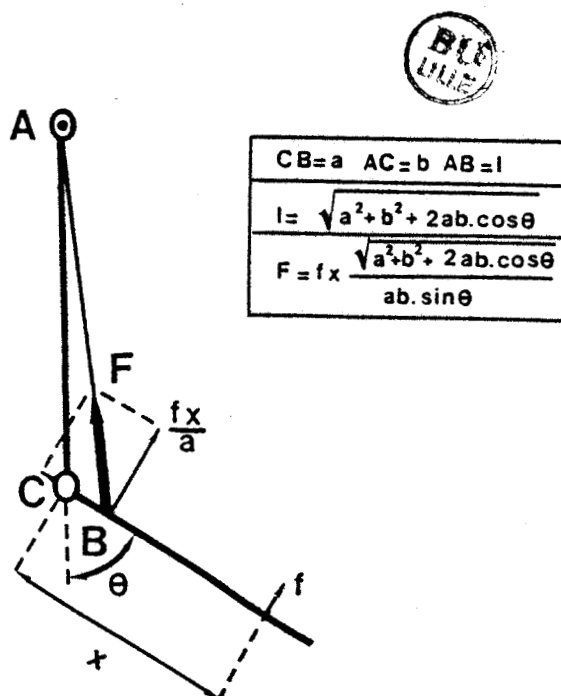


Figure -15- Schéma de calcul de la longueur et de la force du fléchisseur équivalent en contraction isométrique, d'après PERTUZON - 1972.

- En condition isométrique (figure -15-), F est calculée à partir du couple mesuré au poignet.

$$F = fx \frac{1}{ab \sin \theta}$$

f en Newton est la force développée au poignet

x en mètre est le bras de levier de la force.

3- Vitesse

La vitesse de raccourcissement musculaire est mesurée à partir de la vitesse angulaire θ' exprimée en $\text{rad}.\text{sec}^{-1}$.

$$V = \theta' \frac{ab \sin \theta}{\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta}}$$

4- Compliance série (K en mètre par Newton)

La compliance série est représentée par le rapport :

$$K = \frac{\Delta l}{\Delta F}$$

Δl en m

ΔF en Newton.

Les variations de longueur et de force sont calculées au cours de mouvements de quick release.

K est mis en relation avec la force isométrique développée au moment du déclenchement.

L'ensemble du dispositif est présenté sur la figure -16-.

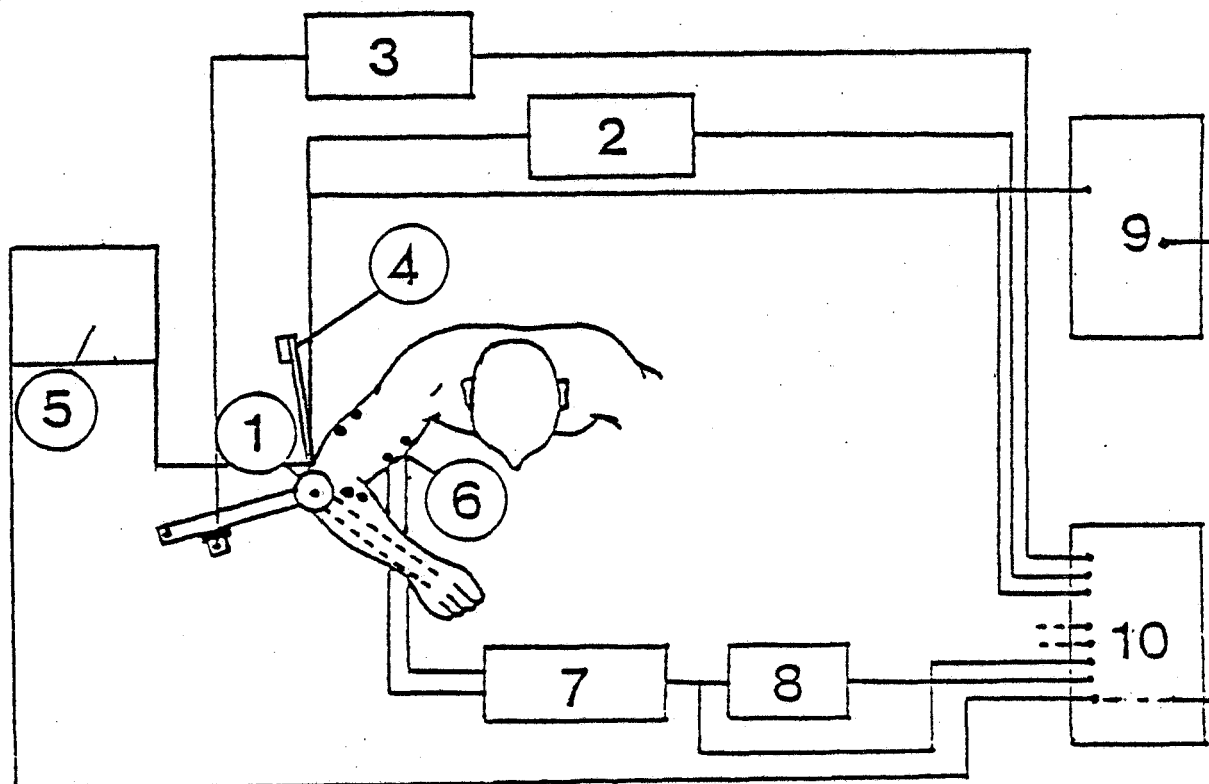


Figure -16- Schéma général des chaînes de mesure et d'enregistrement des variables mécaniques et électromyographiques.

- 1- Goniomètre pour déplacement θ
- 2- Circuit de calcul de la vitesse angulaire θ'
- 3- Mesure de l'accélération angulaire θ''
- 4- Capteur de force et électro-aimant
- 5- Pont de mesure des couples isométriques
- 6- Electrodes d'enregistrement des E.M.G.
- 7- Amplificateur des signaux électromyographiques
- 8- Intégration d'E.M.G.
- 9- Oscilloscope pour contrôle du mouvement
- 10- Enregistreur graphique.

II- PROTOCOLES

A- CHOIX DES SUJETS

15 sujets participent à l'expérimentation. Ils sont répartis en 4 groupes :

- 1 groupe d'entraînement isométrique (4) (G. ISO)
- 1 groupe d'entraînement concentrique (4) (G. CONC)
- 1 groupe d'entraînement excentrique (3) (G. EXC)
- 1 groupe témoin (4) (G.T)

Ces sujets sont des sportifs qui obtiennent des résultats de niveau régional, quant à leurs performances dans des épreuves d'athlétisme de courte durée. Ils pratiquent des spécialités pour lesquelles le bras n'est pas entraîné de façon systématique. Il leur est demandé de ne plus avoir d'entraînement de musculation du train supérieur pendant la période d'entraînement. Les étudiants de l'UER EPS continuent leur pratique sportive polyvalente. Les caractéristiques des sujets sont présentées dans le tableau -VIII-.

NOMS	TAILLES m	MASSES CORP. kg	AGES années	SPECIALITES	PERFORMANCES secondes	GROUPES EXPERIMENTAUX
D.P.	1,88	77	22	400m haies	53"9	témoin
M.B.	1,74	64	20,75	200m	21"6	témoin
L.L.	1,80	66,5	17,25	100m	11"	témoin
V.B.	1,80	79,5	19,60	100m	10"9	témoin
C.S.	1,772	64,45	23,25	110m haies	15"	isométrique
L.E.	1,764	74,7	22,50	110m haies	15"1	isométrique
V.A.	1,74	62,45	21,60	400m	50"5	isométrique
S.Y.	1,74	66,65	21,33	400m	52"5	isométrique
C.J.P.	1,81	74,70	21	200m	22"	concentrique
C.E.	1,82	67,8	20,50	110m haies	14"2	concentrique
B.S.	1,81	80,1	20	100m	11"6	concentrique
B.F.	1,82	69,1	20,50	100m	10"5	concentrique
D.A.	1,83	99,35	19,50	100m	11"3	excentrique
K.E.	1,75	70,8	19,50	100m	10"9	excentrique
H.F.	1,78	75	22,50	100m	11"5	excentrique

Tableau -VIII- CARACTERISTIQUES DES SUJETS DE L'EXPERIMENTATION.

B- DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION

1- Schéma d'organisation générale (figure -17-)

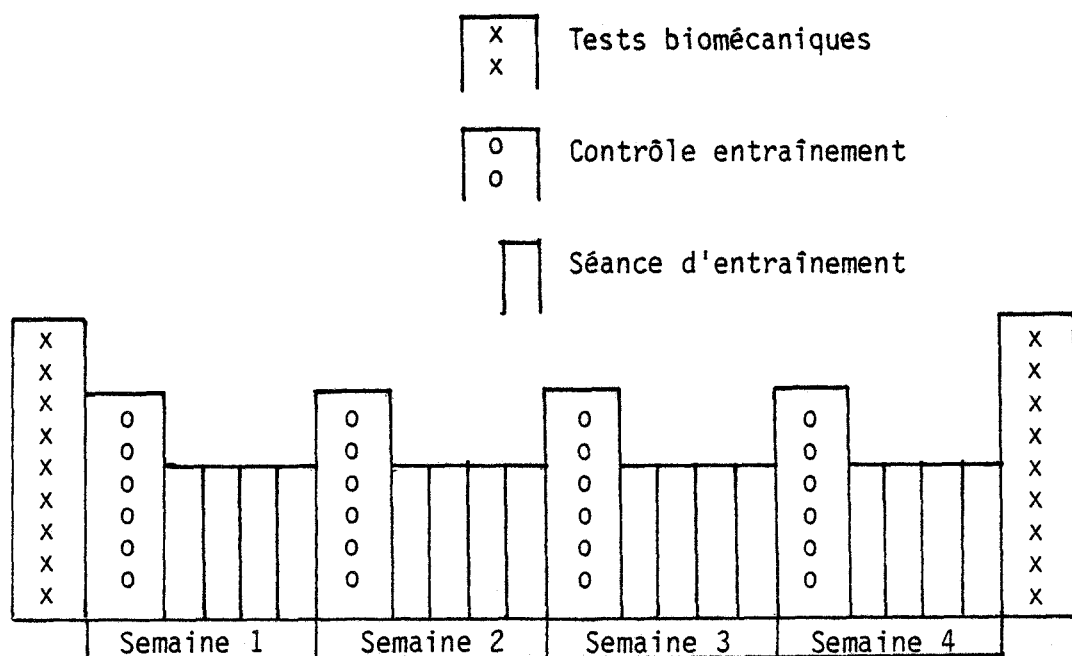


Figure -17- Protocole général d'organisation.

La figure -17- représente l'organisation des groupes qui subissent l'entraînement. On ne contrôlera que les propriétés biomécaniques des muscles du groupe témoin. Les séances tests sont séparées de 4 semaines.

2- Organisation d'une séance d'entraînement

a) contenu de la séance

Parmi les méthodes de développement de la force (ZACIORSKI - 1965), nous avons choisi celle qui est la plus utilisée par les entraîneurs de spécialités dont le niveau de force dynamique est essentiel à la réalisation d'une performance (entraînement inspiré des méthodes "intensives", tableau -V-).

Pour les entraînements dynamique et statique, la séance se compose de 8 séries séparées de 3 minutes de récupération. Les charges sont présentées en pyramide (figure -18-).

Dans l'entraînement isométrique les contractions sont de 3 secondes séparées de 3 secondes de récupération.

L'entraînement s'étend sur une période de 4 semaines à raison de 4 séances par semaine.

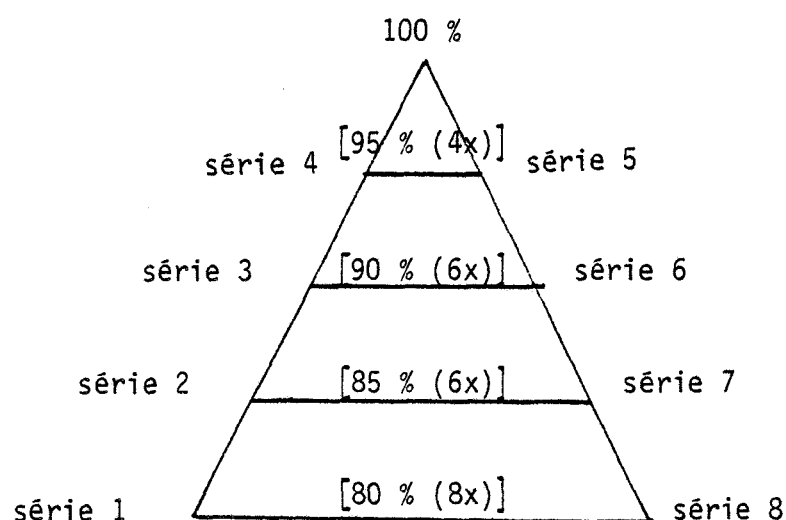


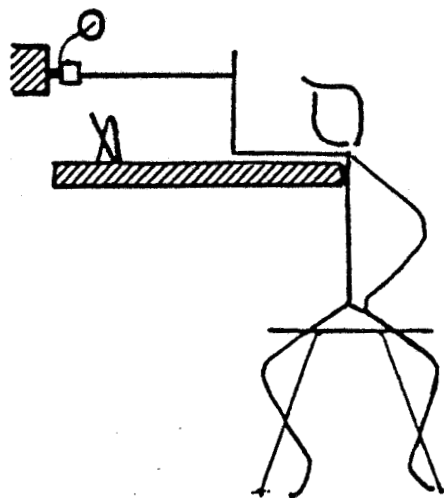
Figure -18- Organisation d'une séance d'entraînement.

b) position et mouvements (figure -19a-b-)

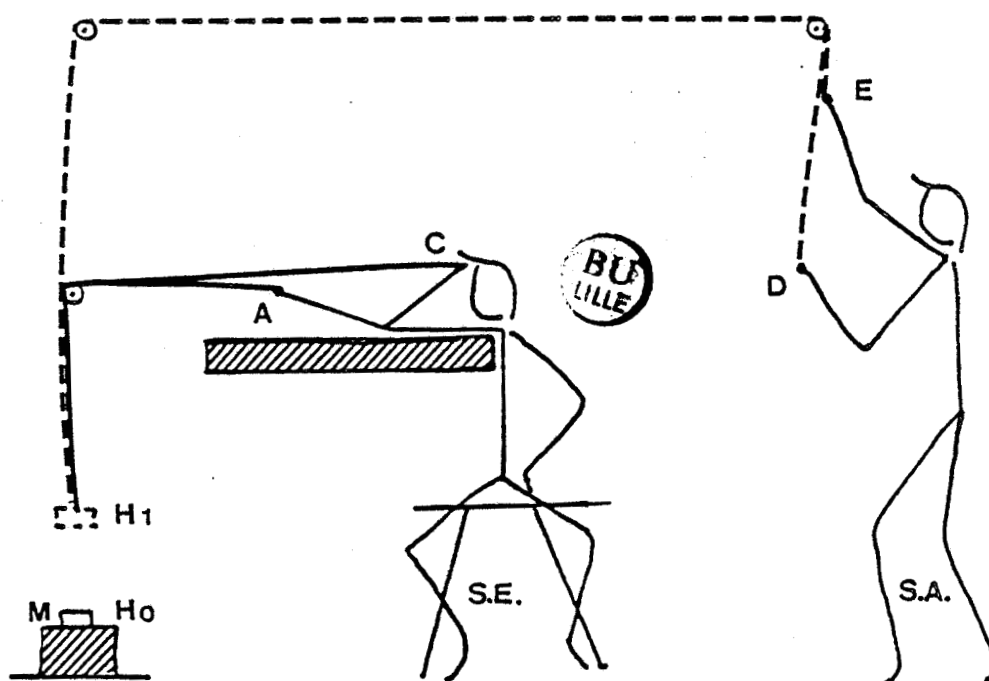
Les sujets sont assis, aisselle en appui, bras à l'horizontale, l'avant-bras et le bras sont dans le prolongement de la ligne des épaules. La main en semi-pronation. La charge est reliée au poignet par l'intermédiaire d'un bracelet. Les mouvements se déroulent dans un plan vertical.

- entraînement isométrique (figure -19a-)

L'angle du coude est de 90°. Le niveau de la force est contrôlé par la déviation de l'aiguille du galvanomètre. Les durées des contractions et des récupérations sont fixées par un métronome.



a- contraction isométrique



- E. conc. S.E. soulève M de Ho à H1, A → C, puis S.A. redépose M en Ho (D → E)
- E. exc. S.A. amène M de Ho à H1 (E → D), puis S.E. redépose M en Ho (C → A)

b- mouvements anisométriques

Figure -19- Mouvements d'entraînement.

- entraînements dynamiques (figure -19b-)

Les mouvements se déroulent de 120° à 30° en excentrique. Les masses sont amenées par des aides extérieures. En concentrique, les mouvements se déroulent de 30° à 120° . Le retour des masses est assuré par une aide extérieure.

3- Etude des variables musculaires

Nous relevons deux séries d'observations :

a) les progrès dans le geste d'entraînement (séance contrôle)

Ils sont mesurés toutes les 4 séances (figure -17-) et représentent la charge maximale (tableau -V-) qui peut être soulevée ou retenue dans les mouvements dynamiques.

Dans les entraînements isométriques, ils représentent la tension maximale contrôlée sur l'écran d'un galvanomètre. Cette évaluation est nécessaire afin de :

- contrôler la cinétique des progrès en relation avec les différents régimes d'entraînement.
- réévaluer les possibilités afin de maintenir les charges d'entraînement à un même niveau pour chacun.

b) propriétés biomécaniques du muscle (séance test)

Les propriétés biomécaniques ne sont étudiées qu'avant et après la session d'entraînement de façon à ne pas interférer dans l'entraînement. En effet, une séance de prise de données biomécaniques dure environ deux heures et les efforts sont en grande partie maximaux. Ils s'effectuent dans deux régimes de contraction musculaire (ISOMETRIQUE et CONCENTRIQUE).

Nous pensons donc qu'une telle séance peut avoir des effets d'entraînement isométrique et concentrique non négligeables.

C- RELEVÉ DES VARIABLES BIOMÉCANIQUES

Les relevés se déroulent toujours dans le même ordre au cours des séances tests.

1- EMG_i - couple isométrique

Les charges sont maintenues à un couple de 75° pendant 3 secondes.

Les couples développés ont pour valeurs respectives en Nxm, (0 ; 4,905 ; 9,81 ; 14,715 ; 19,62 ; 24,575 ; 29,43).

Le couple maximum est obtenu en réalisant la liaison de l'électro-aimant et de l'axe (figure -12-) par un entrefer.

L'angle de 75° est visualisé sur l'écran d'un oscilloscope. La vitesse de défilement du papier de l'enregistreur est de 25 mm x sec⁻¹.

2- Mouvements de Quick-Release (Q.R)

Pour étude de la relation COMPLIANCE - FORCE.

L'angle de départ est de 75°, les couples sont visualisés sur l'écran de l'oscilloscope.

La main est en semi-pronation.

Il est demandé un niveau de couple.

Lorsqu'il est atteint, l'expérimentateur, à l'insu du sujet coupe la liaison de l'électro-aimant et de l'entrefer. Il s'ensuit un mouvement déclenché de flexion.

Le sujet reçoit comme consigne de maintenir stable le niveau du couple et de ne pas freiner ni continuer volontairement le mouvement après la rupture de la liaison.

La main ne doit pas être crispée sur l'attelle.

3 mouvements par niveau de couple sont enregistrés, une récupération de 45 secondes est intercalée entre chaque mouvement.

Les couples sont présentés en ordre croissant.

Le mouvement est enregistré à une vitesse de défilement de 250 mm x sec⁻¹.

3- Mouvements volontaires anisométriques

Pour l'étude de la relation FORCE - VITESSE.

Cinq inerties sont proposées au sujet, dans un ordre croissant.

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{appareillage à vide} = 0,0768 \text{ m}^2 \times \text{kg} \\ I_2 &= \text{appareillage} + M_1 = 0,1268 \text{ m}^2 \times \text{kg} \\ I_3 &= \text{appareillage} + M_3 = 0,3313 \text{ m}^2 \times \text{kg} \\ I_4 &= \text{appareillage} + M_5 = 0,5349 \text{ m}^2 \times \text{kg} \\ I_5 &= \text{appareillage} + M_{10} = 1,0426 \text{ m}^2 \times \text{kg}. \end{aligned}$$

A ces valeurs, il convient d'ajouter l'inertie de l'avant-bras du sujet.

Il est demandé au sujet de venir frapper la butée amortisseur avec le maximum de vitesse et de force. La butée est réglée pour rentrer en jeu à 120°, le sujet reçoit la consigne de continuer l'effort après la percussion.

La plage angulaire du mouvement est de 90°, le départ du mouvement, 30°, est visualisé sur l'écran de l'oscilloscope.

Il est demandé trois mouvements par inertie. Sera retenu le mouvement qui apparaîtra maximum en regard de l'activité électromyographique et de l'accélération.

La vitesse d'enregistrement est de 250 mm x sec⁻¹.

4- Contractions volontaires isométriques

La relation COUPLE - ANGLE est étudiée tous les 15° pour des angles allant de 30° à 120°.

Il est demandé deux contractions par angle.

Les contractions sont maximales et le plateau de force, à maintenir 3 secondes, doit être obtenu le plus rapidement possible.

Le mouvement maximal sera à chaque fois retenu en fonction de 3 critères :

- déviation maximale du couple
- niveau des intégrations
- maintien du couple à un niveau stable.

1 minute de récupération sera accordée entre chaque essai d'une série, environ 2 minutes sépareront chaque série.

Les consignes de début et de fin de contraction sont données par l'expérimentateur.

La vitesse d'enregistrement est de $100 \text{ mm} \times \text{sec}^{-1}$.

5- Réglages annexes

a) calibrages

Les calibrages des chaînes électromyographiques et d'intégration, des déplacements volontaires et réflexe, de la vitesse angulaire sont réalisés au début de chaque séance. Le couple est étalonné à l'issue de la série expérimentale.

L'accéléromètre est calibré en cours d'exécution pour les mouvements de Quick Release, pour les mouvements volontaires contre M_0 - M_1 , M_3 , M_5 - M_{10} .

b) réglages du dispositif ergométrique

Ces réglages sont faits en début d'expérimentation et permettent de contrôler l'horizontalité du bras et de l'avant-bras. L'attelle est réglée pour que l'axe du coude soit confondu avec l'axe de rotation de l'appareillage mobile pour l'amplitude totale des mouvements.

Le zéro de la poulie graduée est obtenu en référence à la position d'extension du bras et de l'avant-bras (figure -13-(4)).

RESULTATS

<u>COMMANDE MOTRICE ET PERFORMANCE MECANIQUE DU MUSCLE</u>	56
<u>RELATION EMGi - COUPLE ISOMETRIQUE</u>	56
<u>DELAI ELECTROMECHANIQUE (DEM)</u>	64
<u>VITESSE DE CONTRACTION</u>	70
<u>PROPRIETES BIOMECHANQUES MUSCULAIRES ET PERFORMANCE MECANIQUE</u>	82
<u>L'ELASTICITE SERIE</u> =====	82
<u>PROPRIETES CONTRACTILES</u> =====	95
<u>I - CONTRACTION ISOMETRIQUE</u>	95
A - RELATION COUPLE-ANGLE	95
B - RELATION FORCE-LONGUEUR	100
C - DISCUSSION	104
<u>II - CONTRACTION ANISOMETRIQUE</u>	108
A - RELATION FORCE-VITESSE	109
B - RELATION PUISSANCE-FORCE	116
C - DISCUSSION	120

L'amélioration des performances motrices liée à l'entraînement peut porter, d'une part, sur les modifications éventuelles de la commande motrice et d'autre part, sur les propriétés biomécaniques du muscle.

Les modifications de la commande sont approchées à partir de l'examen des signaux électromyographiques de surface. Ces signaux rendent compte globalement des mécanismes de recrutement et des niveaux de commande, particulièrement dans le cas de contractions maximales.

Les propriétés biomécaniques des muscles sont caractérisées par leurs propriétés élastiques et contractiles dont on étudiera les modifications.

COMMANDE MOTRICE ET PERFORMANCE MECANIQUE DU MUSCLE

=====

COMMANDE MOTRICE ET PERFORMANCE MECANIQUE

I - <u>RELATIONS EMGi - COUPLE ISOMETRIQUE</u>	56
A - <u>EMGi - COUPLES SOUS-MAXIMAUX</u>	56
1) Protocole expérimental	56
2) Résultats	57
B - <u>EMGi - COUPLE MAXIMAL</u>	59
1) Protocole expérimental	59
2) Résultats	59
C - <u>DISCUSSION</u>	61
1) EMGi et techniques	61
2) EMGi et volume du bras	62
3) Relation EMGi - couple	63
II - <u>DELAI DES REPONSES MECANQUES</u>	64
A - <u>DEFINITION DU DELAI ELECTROMECHANIQUE (DEM)</u>	64
B - <u>ETUDE DU DEM</u>	64
1) Protocole expérimental	65
2) Résultats	65
C - <u>DISCUSSION</u>	69
III - <u>VITESSE DE CONTRACTION</u>	70
A - <u>VITESSE DE CONTRACTION ISOMETRIQUE</u>	70
1) Protocole expérimental	70
2) Résultats	70

B - <u>VITESSE DE CONTRACTION ANISOMETRIQUE</u>	73
1) Protocole expérimental	73
2) Résultats	73
C - <u>DISCUSSION</u>	76
1) Discussion des techniques	76
2) Discussion des résultats.	78

Deux éléments permettent d'étudier les aspects liés à la commande motrice.

L'EMG de surface rend compte du signal d'excitation adressé au muscle. La tension mécanique rend compte du signal de sortie, c'est-à-dire du phénomène contractile lui-même.

C'est pourquoi l'analyse des signaux de la commande sera, dans tous les cas, faite par rapport aux signaux mécaniques de force.

Dans le cas de la contraction isométrique, on caractérisera les relations entre l'EMG et la force.

La performance réalisée par le muscle est également caractérisée par la vitesse à laquelle la force est développée (vitesse de contraction). Elle dépend également du délai entre le début du signal d'excitation (EMG) et le début du phénomène mécanique (force, couple ou accélération).

Ce délai est appelé délai électromécanique (D.E.M.).

I - RELATION ELECTROMYOGRAMME INTEGRE-COUPLE (EMGi - C)

L'EMGi est la mesure de l'activité électrique du muscle en contraction. Nous nous proposons d'étudier les modifications de l'activité électrique des muscles avant et après les différentes modalités d'entraînement (isométrique, anisométrique-concentrique et anisométrique-excentrique).

Cette étude sera menée pour des contractions isométriques sous-maximales et maximales.

A- EMGi - COUPLES SOUS-MAXIMAUX

On étudie la relation qui lie la somme des EMGi des BB et BR et le couple isométrique. Cette somme sera représentée par le symbole Q.

1- Protocole expérimental

La relation est établie pour un angle de 75° de l'articulation du coude. Les couples isométriques développés sont exprimés en $N \times m$

(0, 4.9, 9.8, 14.7, 19.6, 24.2, 29.4). La contraction est maintenue deux à trois secondes, l'angle de l'articulation est visualisé sur l'écran d'un oscilloscope placé face au sujet. Après égalisation des coefficients d'amplification et d'intégration des différentes voies électromyographiques des fléchisseurs, la somme des EMGi (BB + BR) est considérée comme représentative de l'activité du fléchisseur équivalent. Cette valeur est rapportée à l'unité arbitraire définie par BOUISSET (1973), le kilo-statique-seconde.

2- Résultats

a) Choix du modèle d'équation

Les relations EMGi - C ont été ajustées à quatre modèles d'équation mathématique (LINEAIRE, PUISSANCE, LOGARITHMIQUE, EXPONENTIELLE).

Les coefficients de corrélation (r), les plus élevés sont, dans la majorité des cas, obtenus pour le modèle d'équation linéaire, aussi bien avant qu'après entraînement. Ce modèle a donc été choisi pour représenter la liaison entre l'EMGi et le couple isométrique.

b) Comparaison des relations

Les pentes des relations EMGi-f $\frac{C}{C_0}$, avant et après entraînement (figure -20-), sont comparées à l'aide du test "t" de STUDENT.

On constate que :

- L'entraînement isométrique permet de développer un même couple pour un niveau d'EMGi plus faible, c'est-à-dire un niveau plus bas de recrutement ($P < 0,01$). Pour un même niveau de commande, il y aurait donc une plus grande efficacité contractile du muscle (figure -20-b).

- L'entraînement concentrique n'entraîne pas de modification significative de la pente de la relation. Cependant (figure -20-c), pour un même couple développé, le niveau d'excitation tend à diminuer après entraînement.

- Par contre, après entraînement excentrique, un même couple est développé pour un niveau d'excitation plus élevé ($P < 0,05$).

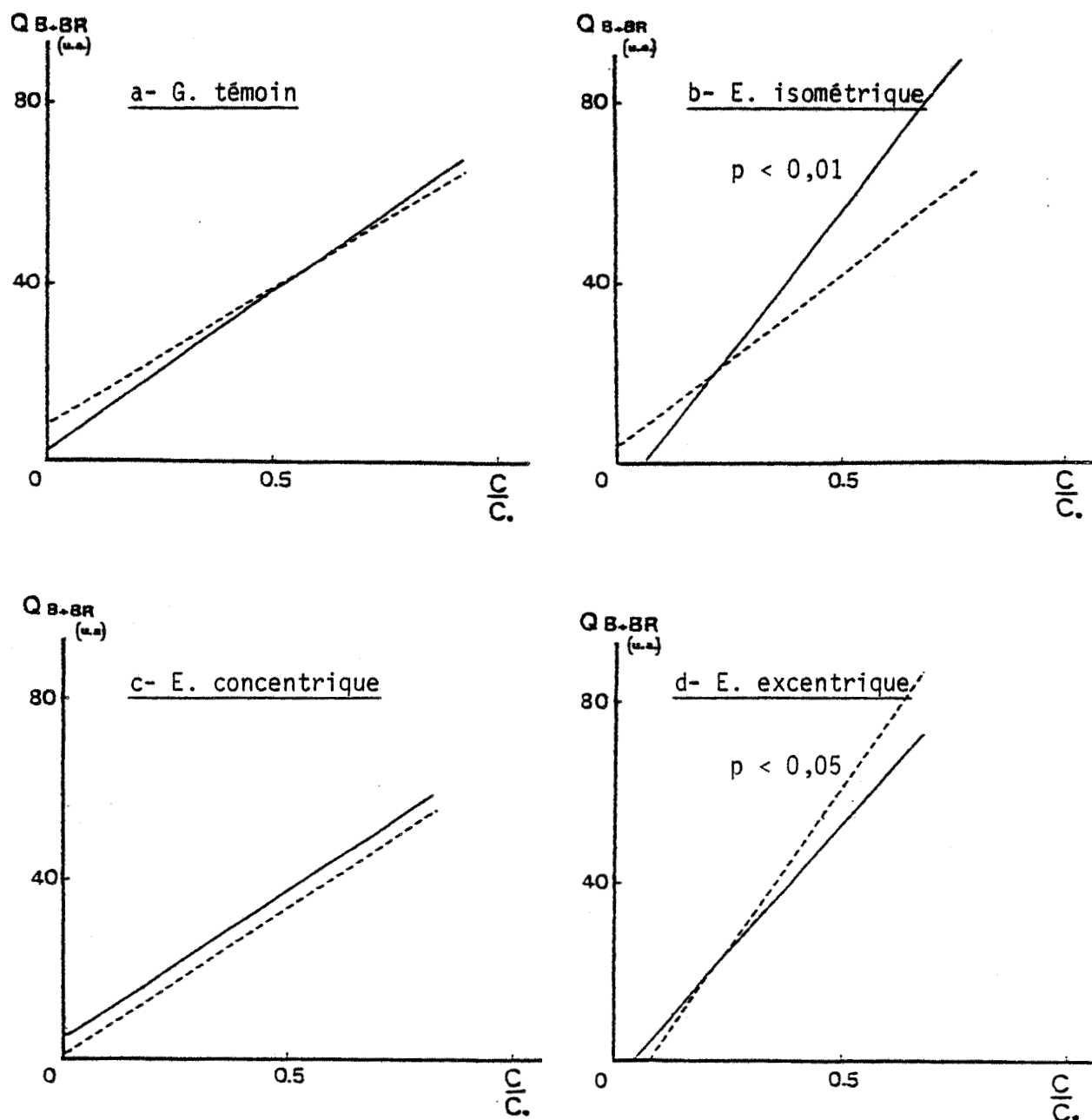


Figure -20- EMG_I - Couple avant et après entraînement.

en trait continu : avant entraînement
 en tiret : après entraînement
 en ordonnée : la somme des EMG_i du biceps et du brachio-radialis en u.a.
 en abscisse : le couple est exprimé par rapport à C_{max} à 75° du 1er test.

B- EMGi - COUPLE MAXIMAL

L'EMGi est fonction, entr'autres facteurs, de la fréquence de battement des unités motrices (U.M.) ainsi que du nombre d'U.M. qui sont activées lors de la contraction musculaire. Si l'on peut admettre qu'une U.M. atteint assez rapidement une valeur stable (MATON 1970, MATON-BOUISSET 1972), la variation de l'activité électrique du muscle doit s'effectuer grâce à un mécanisme de recrutement spatial.

Nous nous proposons de comparer les EMGi en contraction maximale avant et après entraînement.

1- Protocole expérimental

L'EMGi du F.E. est la somme des EMGi du biceps et du brachio-radialis. Les EMGi sont quantifiés pendant une période de une seconde, à partir du moment où le couple est maximal et constant. Ils sont exprimés en unité arbitraire : le kilo-statique-seconde.

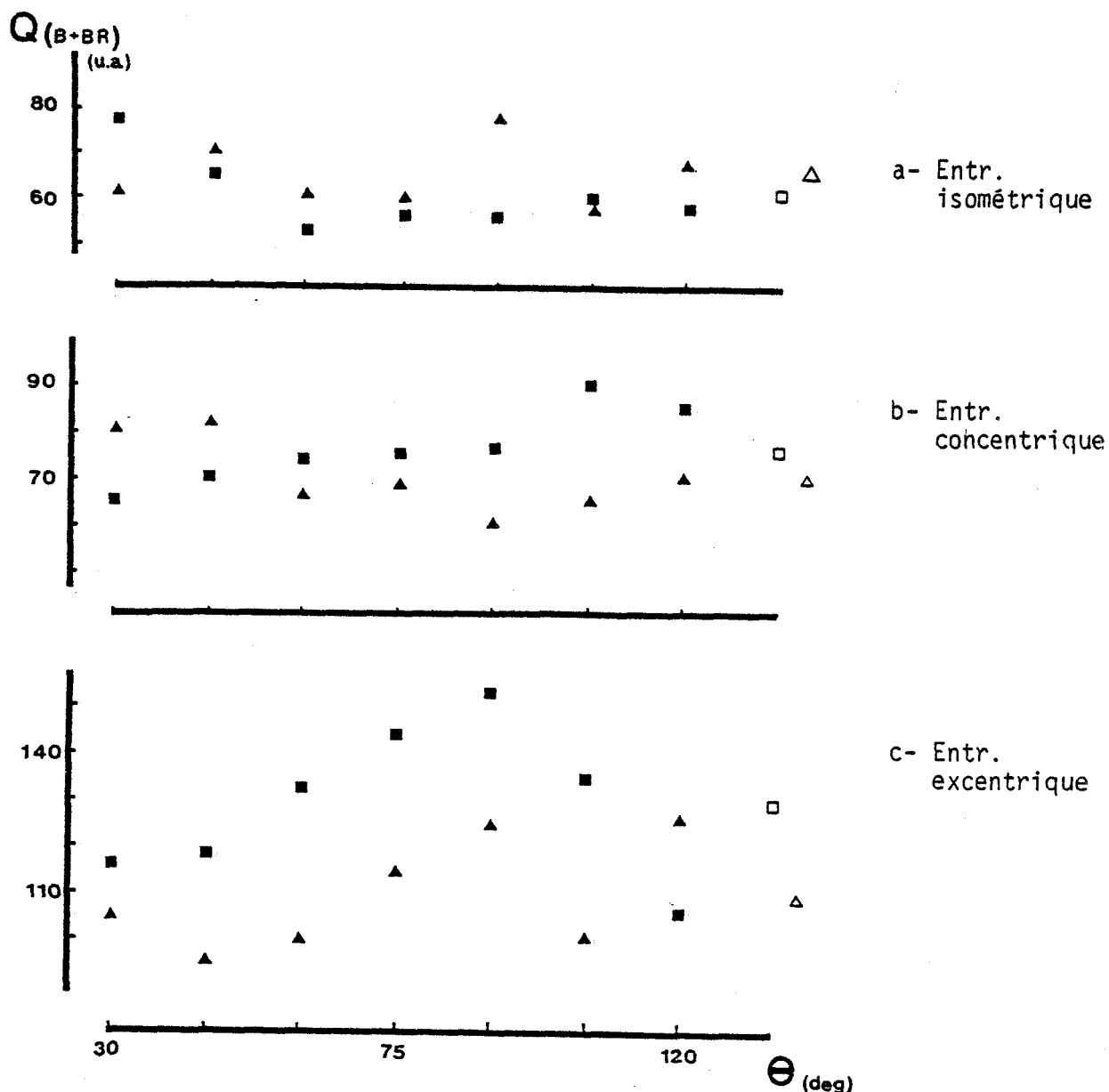
Pour les différents angles de l'articulation, la longueur et la forme du muscle varient et peuvent entraîner des variations de l'EMGi, par la modification du volume conducteur.

De ce fait, les résultats, avant et après entraînement, sont comparés pour chaque angle de l'articulation.

2- Résultats

On constate, (voir figure -21-), en dépit des égalisations des coefficients d'amplification et d'intégration des voies des EMG, une certaine variabilité des niveaux maxima de l'EMGi en fonction de l'angle de l'articulation. Cependant, une analyse de variance des niveaux d'intégration, par le test de KRUSKALL et WALLIS montre que l'angle n'influence pas de façon significative l'EMGi, confirmant ainsi les résultats de VIGREUX et coll. (1979).

De ce fait, les EMGi maximaux sont regroupés par type d'entraînement pour l'ensemble des sujets (tableau n°IX). Dans tous les cas, les EMGi maximaux sont plus élevés après l'entraînement, l'augmentation n'étant toutefois significative qu'après l'entraînement concentrique.



	TYPES D'ENTRAÎNEMENT		
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
AV. ENTRAÎNEMENT	79,5 $\pm$ 24	71,2 $\pm$ 4,42	110,2 $\pm$ 22,8
AP. ENTRAÎNEMENT	97,2 $\pm$ 36,7	86,89 $\pm$ 27,1	114,3 $\pm$ 49,7
DÉGRE DE SIGNIFICATION	ns.	P < 0,01	ns.

TABLEAU IX: EMGi (u.a.) maximaux en contraction isométrique.

L'augmentation des écarts-type après entraînement montre que celui-ci renforce les différences individuelles constatées avant l'entraînement. L'individualisation de ses effets est plus importante en anisométrique. Les contractions anisométriques demanderaient donc des plans de coopération musculaire plus différenciés que les contractions isométriques.

C- DISCUSSION

De nombreux facteurs peuvent influencer le niveau de l'EMGi. Ils ont été étudiés par de nombreux auteurs, citons par exemple, MATON (1975), VIGREUX et coll. (1979), qui étudient entre autre l'influence de la résistance interélectrode, de l'angle de l'articulation et de la distance entre les électrodes. On peut s'interroger par ailleurs, suite à l'entraînement, d'un éventuel effet, sur les EMGi mesurés, d'un accroissement des masses musculaires explorées.

1- EMGi et techniques

La résistance interélectrode (R_i) peut éventuellement modifier les mesures de l'EMGi. En fait, cette résistance a toujours été inférieure à 1000Ω . Ainsi le rapport entre la différence de potentiel mesurée (V) et la différence de potentiel réelle (E) est très proche de 1, compte tenu de la haute impédance d'entrée (Z) des amplificateurs.

$$\frac{V}{E} = \frac{Z}{Z + R_i} = \frac{20.10^6}{20.10^6 + 10^3} = 0,99995$$

Par ailleurs, la localisation des électrodes a été identique pour les deux tests, grâce au marquage effectué lors du premier test.

2- EMGi et volume du bras.

Le volume du bras est apprécié par la mesure de son périmètre, mesurée à l'aide d'un mètre ruban métallique, bras et avant-bras pendants. La mesure est faite à une distance déterminée du pli du coude. Les résultats du tableau N° X montrent que les modifications de l'EMGi pourraient être liées à une modification des masses musculaires du bras.

TYPE D'ENTRAÎNEMENT valeur AP-valeur AV valeur AV x 100	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
EMGi	+ 22,3	+ 22	+ 3,6
Périmètre du bras	+ 2,61	+ 1,07	- 0,689

TABLEAU X : MODIFICATIONS DE EMGi ET PERIMETRE DU BRAS PAR L'ENTRAÎNEMENT.

KOMI et BUSKIRK (1972) n'observent pas de modification significative de l'amplitude des EMG, mesurée en μ volt, après entraînement concentrique ou excentrique. Cependant, dans le cas de l'entraînement excentrique, ces auteurs constatent une augmentation du périmètre du bras, associée à une augmentation de l'EMGi. Il semblerait donc que l'augmentation de la masse musculaire aurait pour conséquence une augmentation des signaux EMG détectés, ce que nous constatons après les entraînements isométrique et concentrique.

3- Relation EMGi- Couple

De nombreux auteurs ont étudié la relation qui lie la force isométrique à l'EMGi. Cette relation est soit linéaire (LIPPOLD 1952, INMAN et coll. 1952, DEVRIES 1968, LIND et PETROFSKY 1979), soit curvilinéaire (BOTTOMLEY et coll. 1963, VREDENBREGHT et RAU 1973), soit linéaire pour les faibles valeurs de la force puis exponentielle (KURODA et coll 1970).

Les relations que nous obtenons, en contraction sous-maximale, sont linéaires. Mais elles sont établies pour des couples éloignés du couple maximum.

Elle est établie pour des couples inférieurs à 30 N x m, alors que le couple maximum peut atteindre 110 N x m à 75°. On doit donc se limiter au caractère linéaire de la relation, pour les force isométriques nettement sous-maximales.

Cependant, THEPAUT-MATHIEU (1984) constate la linéarité des relations EMGi- couple jusqu'à des valeurs de couple de 100 N x m. Il est également observé qu'après entraînement isométrique, pour un même niveau de couple, le recrutement est toujours inférieur qu'avant l'entraînement.

Les résultats semblent montrer un effet plus spécifique de l'entraînement isométrique sur la relation EMGi- couple isométrique. La diminution du recrutement pour un même couple développé semble montrer, après entraînement isométrique contre des charges élevées, que le muscle peut délivrer une tension supérieure. Il serait intéressant d'examiner l'effet de l'entraînement sur la relation EMGi- travail en mouvement concentrique et excentrique, afin de vérifier si la spécificité de l'entraînement est également montrée pour ces modalités d'entraînement.

En effet, RASCH et MOREHOUSE (1957), après une période d'entraînement de 6 semaines, montrent que les gains en force sont obtenus seulement lorsque le geste contrôlé est identique à celui de l'entraînement. Il n'y aurait donc pas une amélioration des propriétés contractiles, mais une amélioration des modalités de mise en jeu des éléments

contractiles. MORITANI et DEVRIES (1979) tempèrent quelque peu cette hypothèse en constatant, qu'après entraînement isométrique, une même force peut être développée avec un niveau d'activité myoélectrique plus faible, grâce à un renforcement des liaisons d'actine et de myosine.

D'après nos résultats qui montrent une individualisation des effets de l'entraînement, quant à l'EMG, on peut penser que les possibilités de progrès sont fonction du niveau de force de départ et du temps consacré à l'entraînement. Les modifications se feraient en deux temps : il y aurait d'abord un effet sur la commande, et ensuite, un effet sur le développement musculaire (FUKUNAGA 1976).

On dira donc que selon le niveau de force avant l'entraînement, les effets de celui-ci sont plus ou moins rapides et on peut également suggérer que la cinétique des progrès est liée aux méthodes d'entraînement. En ce qui concerne l'EMG, l'entraînement isométrique procure des progrès plus rapides.

II - DELAI DES REPONSES MECANIQUES

A- DEFINITION DU DELAI ELECTROMECANIQUE (D.E.M.)

Lorsqu'un message moteur parvient au muscle, il y a excitation des U.M. qui sont le siège d'une activité électrique (EMG). Il s'ensuit une contraction musculaire avec développement de force. Le délai entre le début de l'activité électromyographique et le début de l'activité mécanique du muscle est appelé délai électromécanique.

NORMAN et KOMI (1979), THORSTENSSON et coll. (1976 b) étudiant les valeurs du DEM, constatent que le DEM en contraction excentrique est plus court qu'en contraction concentrique. Ils suggèrent que des modalités d'entraînement particulières pourraient modifier les durées du DEM.

B- ETUDE DU DEM

Nous examinerons les valeurs de DEM dans le cas de contractions isométriques et de contractions anisométriques concentriques.

1- Protocole expérimental

a) *Contraction concentrique (figure -22-)*

La mesure du DEM se fait entre l'apparition du signal électromyographique du biceps (a) et le début du tracé de l'accélération (b).

b) *Concentration isométrique (figure -23-)*

Le DEM est mesuré entre l'apparition du signal électromyographique du biceps (a) et le début de la déviation du couple (C).

2- Résultats

a) *Contractions concentriques*

Le tableau n° XI présente les valeurs du DEM en fonction des inerties. En contraction isométrique, on considère que l'inertie est infinie. Sur le tableau, on a regroupé les valeurs de l'ensemble des sujets, mesurées lors du premier test.

$I m^2 \times kg$	0,0768	0,1268	0,3913	0,5349	1,0426	α
DEM (msec)	38,7	38,6	39,5	43,85	47,38	52,9
δ (msec)	27,8	16,9	21,6	30,8	29,6	7,99

TABEAU n° XI : EFFET DE L'INERTIE SUR LE DEM.

On constate une augmentation progressive du DEM en fonction de l'inertie opposée au déplacement. Cette augmentation, systématique, n'est toutefois pas significative (test de KRUSKALL et WALLIS). Les différences observées sont vraisemblablement dues à la difficulté de déterminer avec précision le début des tracés de l'accélération, et de l'EMG du biceps, principalement pour les inerties les plus élevées.

Les valeurs du DEM ont donc été moyennées avant et après entraînement, pour l'ensemble des sujets et pour chaque modalité d'entraînement. On constate que les différents entraînements n'ont pas d'effet sur le DEM, lorsque les tests sont effectués en contraction anisométrique concentrique (voir tableau n° XII).

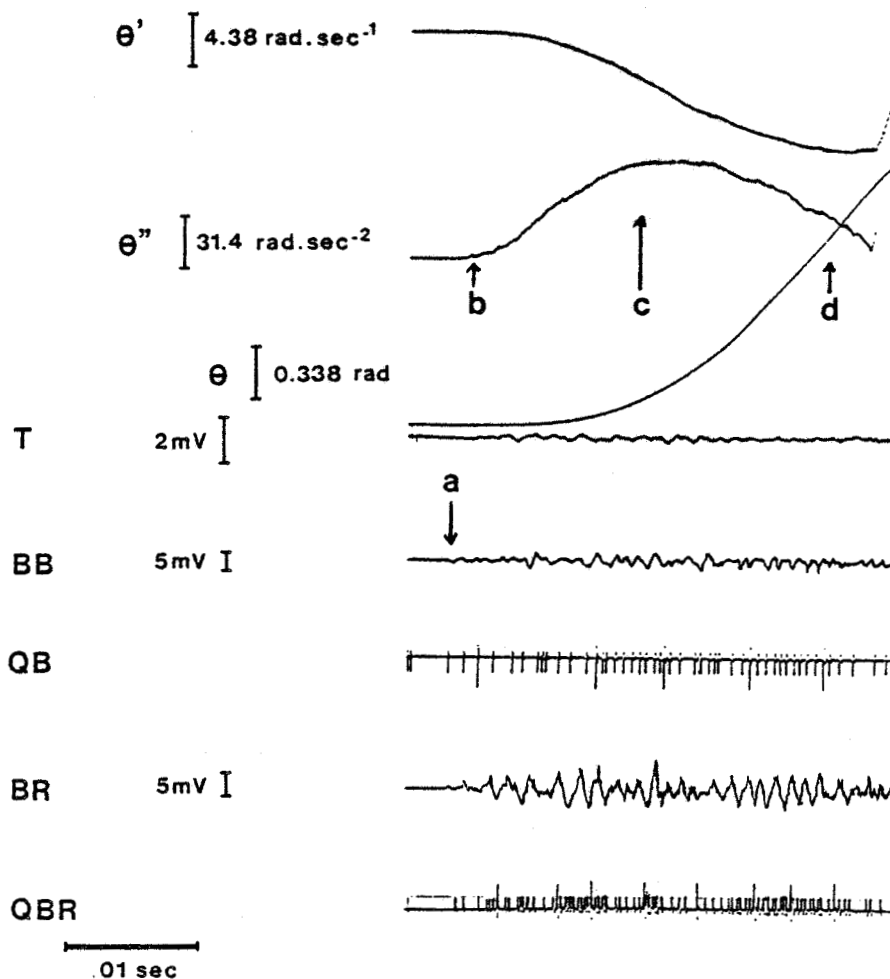


Figure -22- Mouvement anisométrique de flexion.

θ' = vitesse angulaire en rad x sec⁻¹
 θ'' = accélération angulaire en rad x sec⁻¹ x sec⁻¹
 θ = déplacement angulaire en rad
T = EMG du triceps
BB et BR = EMG des biceps et brachio radialis
QB et QBR = EMG_i des biceps et brachio radialis.

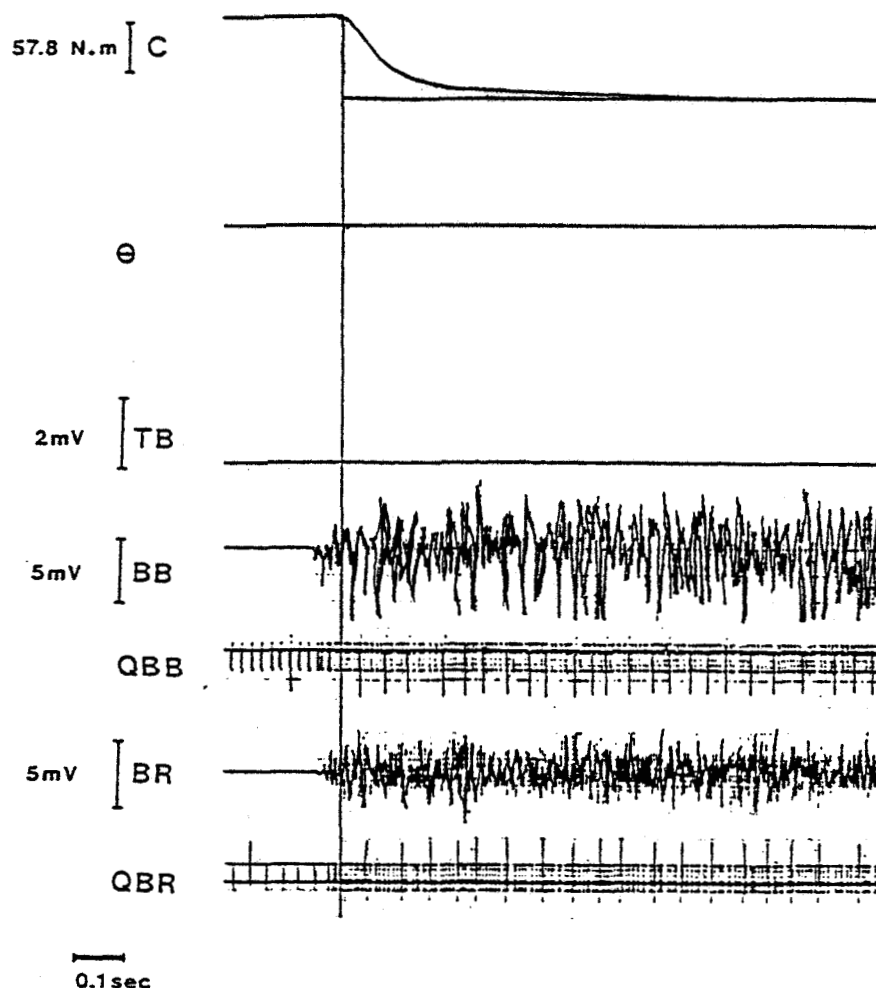


Figure - 23- Mouvement isométrique de flexion

C = couple

θ = déplacement angulaire

TB = EMG triceps, BB = EMG biceps brachii,

BR = EMG brachio radialis

QBB = EMG_i biceps brachii, QBR = EMG_i brachio radialis

a = début activité du biceps

Contraction d'un sujet pour un angle à 90°.

	TYPES D'ENTRAINEMENT			
DEM (ms)	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE	TEMOIN
AVANT ENT. (T_1)	36 $\pm$ 9,2	28,5 $\pm$ 6,2	30,7 $\pm$ 3,44	31 $\pm$ 8,75
APRES ENT. (T_2)	35 $\pm$ 12	27,8 $\pm$ 9,6	30,2 $\pm$ 7,71	34,7 $\pm$ 8,9

TABLEAU n° XII : DEM EN CONTRACTION ANISOMETRIQUE

b) Contractions isométriques

Après avoir vérifié, sur un groupe que l'angle de l'articulation n'avait pas d'influence sur le DEM, nous avons, pour chaque sujet, moyenné les DEM mesurés aux différents angles, puis moyenné les DEM de l'ensemble des sujets pour chaque modalité d'entraînement.

Le tableau n° XIII regroupe les valeurs mesurées lors des tests 1 et 2. L'analyse des résultats par le U de MANN et WHITNEY sur les petits échantillons indique que l'on ne peut accorder aucune signification aux différences constatées lors des tests.

	TYPES D'ENTRAINEMENT			
DEM (ms)	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE	TEMOIN
AVANT ENT. (T_1)	53,56 $\pm$ 6,99	49,40 $\pm$ 10,6	53,2 $\pm$ 6,5	56,2 $\pm$ 7,6
APRES ENT. (T_2)	53,66 $\pm$ 5,7	45,05 $\pm$ 10,23	50,1 $\pm$ 12,48	56,14 $\pm$ 8,7

TABLEAU n° XIII: DEM EN CONCENTRATION ISOMETRIQUE

C- DISCUSSION

NORMAN et KOMI (1979) trouvent des valeurs de 41 msec pour le DEM du biceps en contraction concentrique. CAVANAGH et KOMI (1979) obtiennent des valeurs de 49 msec en excentrique, 53,9 msec en isométrique et 55,4 msec en concentrique pour le biceps brachii. Les valeurs que nous obtenons en contraction isométrique sont proches de celles de la littérature.

Toutefois, nous observons des DEM plus courts en contraction anisométrique qu'en contraction isométrique.

La différence peut s'expliquer par la technique de mesure du DEM. D'une part, les vitesses d'enregistrement sont différentes pour les mouvements anisométriques ($250 \text{ mm} \times \text{sec}^{-1}$) et isométriques ($100 \text{ mm} \times \text{sec}^{-1}$). D'autre part, les repères mécaniques pour le développement de la force sont l'accélération en mouvement anisométrique et le couple en contraction isométrique. Ces éléments rendent difficilement comparables les valeurs trouvées dans les deux types de contraction musculaire. Il faut également noter que si la différence semble importante (52,9 msec en isométrique et 37,8 msec en concentrique), elle n'est toutefois pas significative.

De plus, les mouvements en contraction anisométrique, sont réalisés dans un plan horizontal contre des inerties.

Ils s'effectuent donc sans effet de la pesanteur sur les masses mobilisées. Par conséquent, les contractions anisométriques ne peuvent pas avoir le caractère d'une contraction à "Précharge", telle qu'elle a été étudiée in situ (BRAUNWALD et coll. 1967).

Finalement, la difficulté d'apprécier le DEM serait avant tout une difficulté d'apprécier le début du tracé mécanique (couple) ou cinématique (accélération). Il serait donc souhaitable, si une étude plus détaillée de ce DEM devait être faite, de repérer le début de l'activité mécanique non pas à partir des tracés du couple ou de l'accélération, mais à partir des tracés de leur dérivé, c'est-à-dire, à partir du calcul instantané de la vitesse de contraction.

En résumé, on peut dire que l'entraînement ne produit pas d'effets visibles sur le DEM, lorsqu'il est mesuré lors de mouvements concentriques ou isométriques. Il reste cependant à noter qu'en contraction anisométrique concentrique, le DEM augmente avec l'inertie déplacée. La contraction isométrique pouvant être considérée comme une contraction anisométrique contre une inertie infinie.

III - VITESSE DE CONTRACTION

C'est le quotient de la force développée par le temps mis pour l'atteindre. Il s'exprime en NEWTON par seconde. VIITASALO et KOMI (1978) étudient la cinétique du développement de la force isométrique maximale dans une contraction volontaire, chez des sujets entraînés et non entraînés. Le temps mis pour atteindre un niveau de force est plus court chez les sujets entraînés.

L'étude porte ici sur la vitesse de contraction, après entraînement, au cours de contractions volontaires isométriques et anisométriques concentriques.

A- VITESSE DE CONTRACTION ISOMETRIQUE

1- Protocole expérimental

Compte tenu des difficultés à apprécier le début du développement de la force et le début du palier atteint (voir paragraphe précédent et figure -23-), la vitesse de contraction isométrique est calculée à partir des mesures de force et de temps qui séparent les moments où sont développés 20% et 80% de la force, finalement atteinte (V_C ISO 20-80). Cette méthode ne permet pas d'étudier les valeurs maximales de vitesse de contraction, mais elle nous permet de comparer une modification de l'indice V_C ISO 20-80 après les périodes d'entraînement isométrique, concentrique ou excentrique.

2- Résultats

Une analyse complète des résultats du premier test, montre que la longueur du muscle a une influence sur la vitesse de contraction.

Celle-ci diminue lorsque la longueur du muscle diminue, c'est-à-dire pour les valeurs croissantes de l'angle de l'articulation du coude (tableau n° XIV).

Comme on le verra plus loin, dans l'étude des relations $F - L$ du fléchisseur équivalent, les niveaux de force développés pour les angles les plus grands de l'articulation sont plus faibles que pour les petits angles de l'articulation, c'est-à-dire pour les grandes longueurs du muscle.

Comme par ailleurs, il ne semble pas que la longueur du fléchisseur équivalent modifie sensiblement les temps et niveaux de recrutement (EMG), la diminution de V_C 20-80, lorsque l'angle croît, serait donc une simple conséquence de la diminution du niveau de force atteint au cours de la contraction.

ANGLES (degrés)	30	45	60	75	90	105	120
V_C 20 - 80 $N - sec^{-1} \times 10^3$	17,1	16,1	14,8	13,9	12,9	11,9	10,4
écart-type (Δ)	2,29	4,5	4,27	5,8	4,9	5,04	4,56

TABLEAU n° XIV: VITESSE DE CONTRACTION ISOMETRIQUE POUR LES DIFFERENTS ANGLES DE L'ARTICULATION.

Les résultats de V_C ISO 20-80 sont donc étudiés pour chaque angle de l'articulation (figure - 24-).

Pour tous les groupes, l'allure générale des courbes obtenues au 2ème test sont les mêmes que celles obtenues lors du 1er test, c'est-à-dire que la vitesse de contraction diminue en même temps que la longueur du muscle.

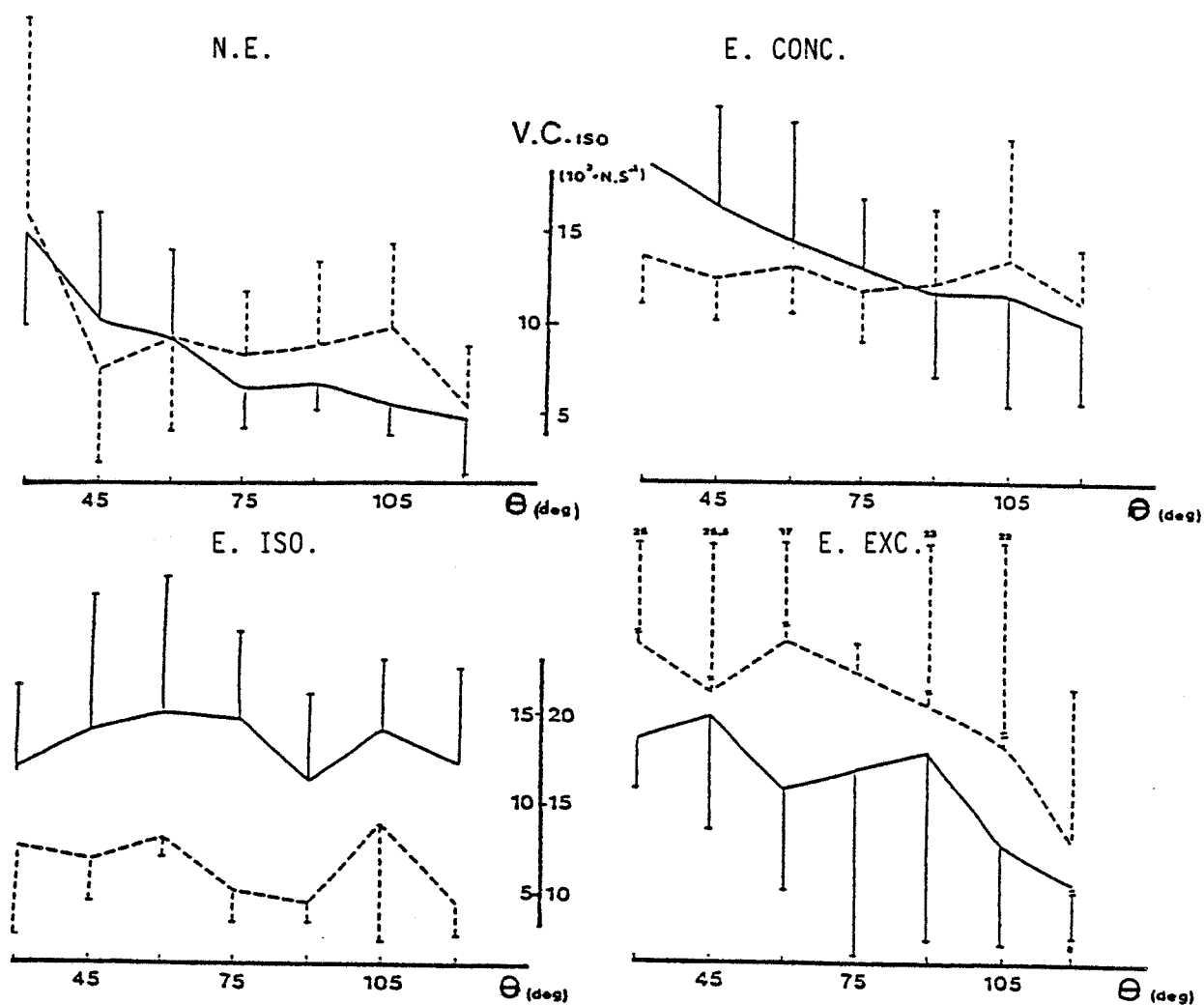


Figure -24- VC ISO et angles de l'articulation, avant et après entraînement

VC en $\text{Newton} \times \text{sec}^{-1}$

θ en degré

en trait continu : relation avant entraînement

en trait discontinu : relation après entraînement.

Le groupe d'entraînement excentrique augmente sa V_C ISO 20-80 ($P < 0,01$), tandis que le groupe d'entraînement concentrique montre une tendance à diminuer ses performances (différence non significative) et que le groupe d'entraînement isométrique obtient des vitesses de contraction isométrique plus faibles ($P < 0,01$). Le groupe témoin ne présente par ailleurs pas de différence significative. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de HAKKINEN et coll. (1980) en ce qui concerne l'entraînement concentrique.

B- VITESSE DE CONTRACTION ANISOMETRIQUE (V_C ANISO)

V_C ANISO est le quotient de la force maximale anisométrique obtenue, par le temps mis pour l'atteindre. Il s'exprime en NEWTON par seconde.

1- Protocole expérimental

Pour chaque sujet, on a retenu la valeur de V_C ANISO correspondant au mouvement pour lequel la force de contraction est maximale, c'est-à-dire dans la grande majorité des cas, dans les mouvements contre les inerties les plus élevées.

Le temps (voir figure -22-) est mesuré à partir du début du développement de la force, jusqu'au moment où la force est maximale (segment bc). Il faut noter que la force maximale est souvent obtenue avant que l'accélération soit maximale, le décalage est d'autant plus important que l'inertie opposée au déplacement est élevée.

2- Résultats

La force maximale est atteinte en $145 \text{ msec} \pm 30,2$. Ces valeurs sont proches de celles de PERTUZON (1972), pour des inerties additionnelles sensiblement identiques à celles que nous avons utilisées. L'angle de l'articulation à l'instant où la force est maximale est de $37^\circ \pm 3,06$. La faible variation de l'angle, à laquelle s'effectue la mesure de la force maximale, indique que celle-ci se fait à des longueurs du muscle bien standardisées.

Le tableau XV rassemble les valeurs de V_C ANISO par type d'entraînement. Les V_C ANISO sont calculées à partir des mouvements pour lesquels la force maximale est atteinte, elles sont ensuite moyennées par type d'entraînement.

	TYPES D'ENTRAÎNEMENT					
	ISOMETRIQUE		CONCENTRIQUE		EXCENTRIQUE	
V_C ANISO ($N \times sec^{-1}$)	$V_C \times 10^3$	Δ	$V_C \times 10^3$	Δ	$V_C \times 10^3$	Δ
AV. ENTRAÎNEMENT (T_1)	14,67	2,5	12,19	2,48	12,7	3,16
AP. ENTRAÎNEMENT (T_2)	18,31	3,86	12,83	2,40	15,03	2,21

TABLEAU n° XV : VITESSES DE CONTRACTION ANISOMETRIQUE POUR LA FORCE MAXIMALE

On remarque que les vitesses de contraction ont tendance à augmenter après tous les types d'entraînement. Les gains sont plus importants que les entraînements isométrique et excentrique. L'entraînement concentrique n'aboutit qu'à des progrès minimes.

La figure -25- montre les modifications de la V_C ANISO, pour des mouvements maximaux réalisés contre des inerties différentes.

Quels que soient les groupes, les valeurs initiales relevées lors du 1er test se situent entre 11×10^3 et $20 \times 10^3 N \times sec^{-1}$, les valeurs les plus élevées sont obtenues dans les mouvements réalisés contre les inerties les plus faibles.

Après entraînement isométrique ou excentrique, la V_C ANISO est soit améliorée, soit maintenue. Les variations sont plus importantes pour les inerties élevées après l'entraînement isométrique et pour les inerties faibles après l'entraînement excentrique.

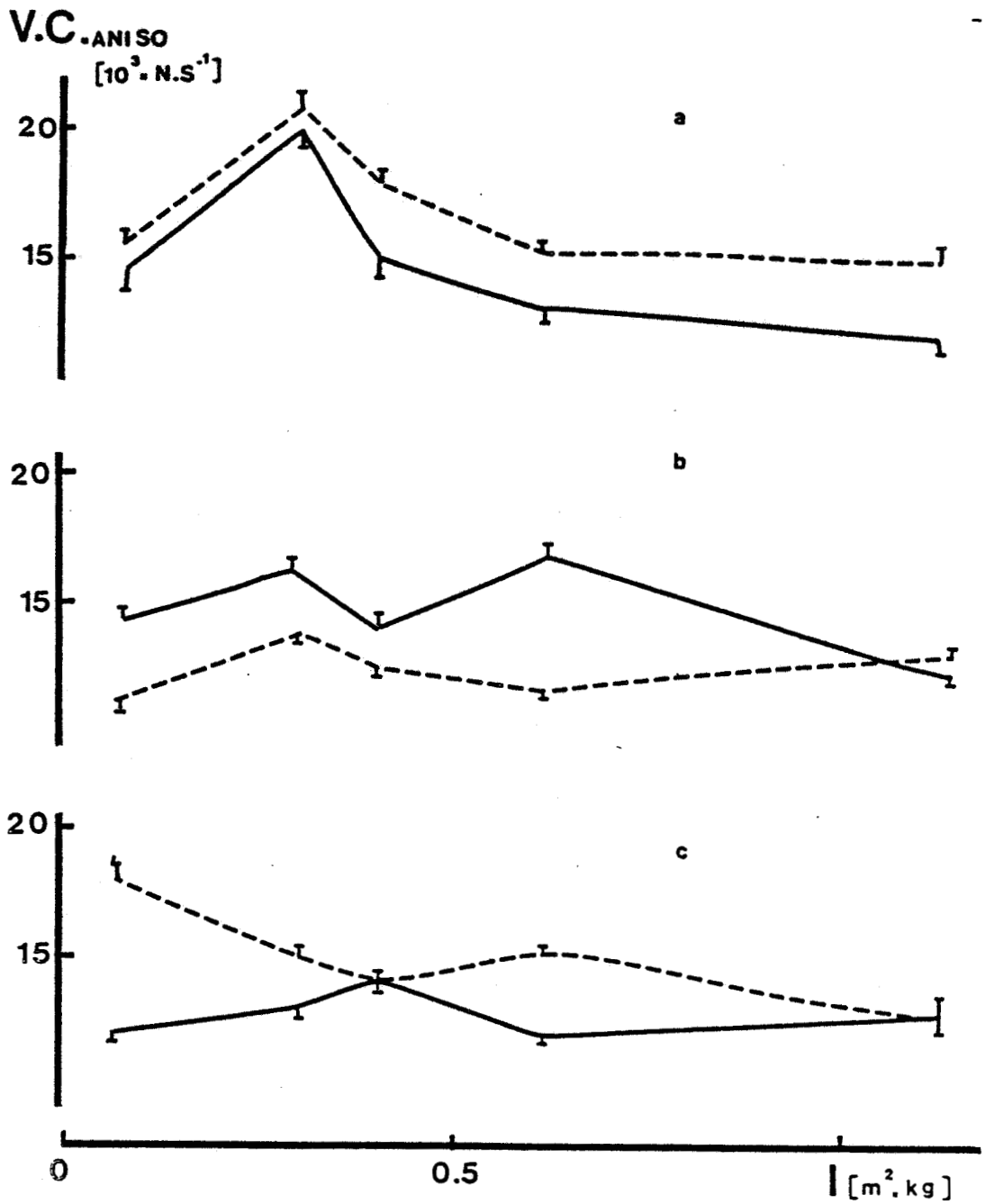


Figure -25- Vitesse de contraction anisométrique en fonction des inerties.

en trait continu : avant entraînement

en tiret : après entraînement

VC ANISO en $10^3 \times$ Newton par seconde

I en $m^2 \times kg$

a = G. ENT ISO

b = G. ENT CONC

c = G. ENT EXC

L'entraînement concentrique aboutit à une diminution de V_C ANISO, sauf en ce qui concerne l'inertie la plus élevée. Il faut remarquer que pour ce groupe, la force maximale dynamique est inférieure après entraînement. Ce fait peut suffire à expliquer que la V_C ANISO contre l'inertie la plus élevée soit plus importante après entraînement.

Ces observations permettent de préciser les résultats présentées au tableau n° XV sur la vitesse de contraction obtenue pour la force maximale développée. On constate donc que l'entraînement modifie les vitesses de contraction en l'augmentant après les entraînements isométrique et excentrique et en la diminuant après l'entraînement concentrique.

C- DISCUSSION

L'étude des résultats de la vitesse de contraction, isométrique et anisométrique impose quelques commentaires sur les techniques avant de discuter des résultats.

1- Discussion des techniques

a) *Vitesse de contraction isométrique*

Lors d'une contraction isométrique, le plateau de force ne s'établit pas de façon régulière. Sur la figure - 26-, nous voyons que le temps mis pour atteindre la force maximale s'établit en trois phases, une phase initiale au cours de laquelle la force croît lentement, une phase de croissance rapide, puis une phase de croissance lente jusqu'à l'obtention du plateau maximal. VIITALASO et KOMI (1978) montrent que la dernière phase est plus ou moins longue à s'installer, ils préconisent de mesurer le temps de montée de force pour un niveau inférieur à 90% de la force maximale. Nos conditions de mesure de V_C ISO, entre le moment où la force atteint 20% et 80% de la force maximale, permettent une détermination relativement précise de la vitesse de contraction en faisant abstraction des parties, initiales et terminales du tracé, susceptibles d'entraîner une imprécision des mesures.

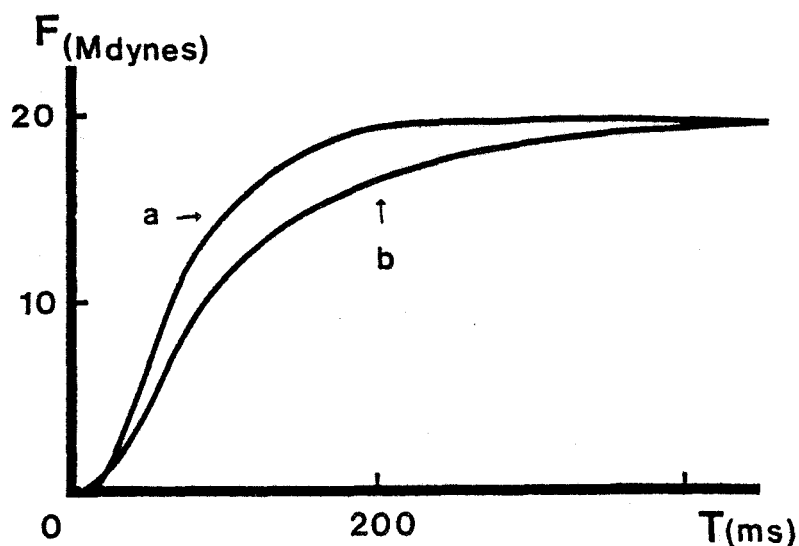


FIGURE - 26 - Montée de la force en fonction du temps au cours de contraction isométrique des fléchisseurs du coude d'après WILKIE (1950)
 a) tracé bras seul
 b) tracé obtenu avec l'adjonction d'une compliance additionnelle.

b) Vitesse de contraction anisométrique

Dans les mouvements anisométriques maximaux, la force développée est d'autant plus importante que l'inertie est élevée.

La diminution du temps de contraction en fonction de l'inertie, est donc le résultat d'une augmentation du temps de recrutement.

On peut s'étonner que cette décroissance de la vitesse ne soit pas régulière de I_0 à I_{10} . La mesure du temps de contraction pour I_0 et I_1 , respectivement de $73 \text{ msec} \pm 13$ et $81 \text{ msec} \pm 19$, montre qu'ils

diffèrent de 8 msec, c'est-à-dire de la valeur du pas d'échantillonnage que nous avons utilisé pour calculer la force. On peut donc difficilement dire, dans ces conditions que la différence soit significative.

Il apparaît donc de façon générale que la vitesse de contraction diminue lorsque les inerties augmentent. La force maximale développée étant plus importante pour les inerties élevées, la diminution de la vitesse de contraction doit être liée à l'augmentation du temps mis pour atteindre cette force. Le temps de recrutement augmenterait donc selon le niveau de force développée.

2- Discussion des résultats

Le calcul de la vitesse de contraction indique qu'elle dépend de plusieurs facteurs :

du niveau de force développée

du temps de recrutement

de l'interaction des éléments contractile et élastique série,
par conséquent, d'éventuelles modifications de la compliance-sériee.

L'ensemble des résultats est regroupé dans le tableau XVI.

	TYPES D'ENTRAINEMENT		
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
V_C ISO	- **	-	+ **
V_C ANISO	+	-	+

TABLEAU n° XVI : RESUME DES MODIFICATIONS DES VITESSES DE CONTRACTION ISOMETRIQUE ET ANISOMETRIQUE APRES ENTRAINEMENT.

(Le signe - traduit une diminution, le signe + une augmentation,
** définit un seuil de signification à $P = 0,01$).

Les entraînements concentrique et excentrique aboutissent à des modifications de la vitesse de contraction qui vont dans le même sens pour les contractions isométrique et anisométrique concentrique, tandis que l'entraînement isométrique produit des effets inverses selon le type de mouvement.

a) Effet de l'entraînement concentrique

Après ce type d'entraînement, on constate une diminution de V_C ISO 20-80 et V_C ANISO.

La diminution de V_C ANISO est de 11,8% pour une diminution moyenne de la force maximale contre les différentes inerties, de 2,6%. Il semble donc que l'augmentation du temps de contraction (+ 11,2%) soit le facteur déterminant de la modification de V_C ANISO.

V_C ISO 20-80 diminue malgré une augmentation de la force de contraction isométrique. La diminution de V_C ISO est donc liée ici encore, à une augmentation du temps de recrutement.

b) Effets de l'entraînement excentrique

La force est améliorée dans les deux modalités de contraction musculaire testées. En contraction isométrique, le temps mis pour développer un même niveau de force, est plus court après entraînement. En contraction anisométrique, la vitesse de contraction augmente (+ 18%) sous le double effet de l'augmentation de la force (5,9%) et de la diminution du temps de recrutement (7,2%).

On s'aperçoit donc que les modifications de la vitesse de contraction après chacun des entraînements anisométriques sont davantage liées au temps de recrutement qu'aux modifications du niveau de la force.

c) Effets de l'entraînement isométrique

Après cette modalité d'entraînement, V_C ANISO est augmentée (14,7%) sous le double effet de l'augmentation de la force

(8,6%) et de la diminution du temps de recrutement (3,14%).

V_C ISO 20-80 est par contre diminuée ($P < 0,01$), bien que la force isométrique soit augmentée. La diminution est donc liée à une augmentation importante du temps de recrutement ($P < 0,01$).

On remarque donc que les modifications des V_C diffèrent selon le type d'entraînement. DUCHATEAU et HAINAUT (1981) rendent compte d'une augmentation de V_C après entraînement concentrique ou isométrique, lorsque le muscle est stimulé électriquement. Dans les conditions de contraction maximale volontaire, les aspects de la commande peuvent être différents. On peut suggérer qu'il se produit un glissement, dans le recrutement des U.M., vers les U.M. plus lentes après l'entraînement anisométrique concentrique et vers les U.M. plus rapides après entraînement isométrique et anisométrique excentrique. Une étude du spectre de fréquence de l'EMG pourrait apporter une réponse à cette hypothèse, qu'il n'est pas possible de vérifier dans le cadre de notre expérimentation.

On peut s'attendre par ailleurs à ce que les relations compliance-force soient modifiées par l'entraînement. En effet, WILKIE (1950), (sur figure -26- courbe b) montre que le temps de contraction est augmenté par l'adjonction d'une compliance additionnelle. De ce fait, il est essentiel d'examiner les effets de l'entraînement sur la compliance de la CES.

En résumé à ce chapitre sur les aspects liés à la commande, on a pu observer que :

1) Le DEM n'est pas modifié par l'entraînement, tant en contraction anisométrique qu'en contraction isométrique.

2) L'EMGi, en augmentation en contraction maximale, montre que le recrutement d'unités motrices est plus important après entraînement. La diminution de l'EMGi en contraction sous-maximale après entraînement isométrique, indique que les effets de l'entraînement vont dans le sens de l'augmentation de la force des muscles.

Le maintien et l'augmentation de l'EMGi en contraction sous-maximale après entraînements concentrique et excentrique montrent que quatre semaines d'entraînement anisométrique aboutiraient surtout à une modification du recrutement des U.M.

3) La V_C , qui augmente après entraînements isométrique et excentrique, semble indiquer que ces deux types d'entraînement améliorent la qualité de force explosive (tableau II). Ce constat ne se vérifie pas après l'entraînement concentrique.

PROPRIETES BIOMECHANIQUES MUSCULAIRES ET PERFORMANCE MECANIQUE

=====

Dans le modèle à deux composantes de HILL (1938), la CC et la CES agissent en interaction au cours des contractions musculaires. Elles caractérisent les propriétés mécaniques du muscle et seront étudiées séparément.

L'on étudiera successivement l'élasticité série et les propriétés contractiles.

L'ELASTICITE - SERIE

I - <u>DESCRIPTION DES ENREGISTREMENTS</u>	82
A - MECANOGRAMMES	82
B - ELECTROMYOGRAMMES	84
C - CRITERES DE VALIDITE DES MOUVEMENTS	84
II - <u>RESULTATS</u>	85
A - DESCRIPTION DE LA RELATION K - F	85
B - CHOIX DU MODELE DE REPRESENTATION	85
C - EFFETS DE L'ENTRAINEMENT SUR LES MODIFICATIONS DES RELATIONS	87
III - <u>DISCUSSION</u>	87
A - DISCUSSION DE LA TECHNIQUE	87
1- Recueil des données	87
2- Limites de la technique de mesure de la compliance par le Quick-Release.	88
B - DISCUSSION DES RESULTATS	90
1- Compliance et vitesse de contraction	90
2- Compliance et restitution d'énergie	91
3- Compliance et entraînement concentrique.	92

L'élasticité série est étudiée à partir de la compliance (K) qui est définie par le rapport entre la variation de longueur du muscle (Δl) et la variation correspondante de la force (ΔF).

$$K = \frac{\Delta l}{\Delta F}$$

K en mètre par NEWTON (m. N⁻¹)

Δl en mètre

ΔF en NEWTON

C'est par l'intermédiaire de la relation COMPLIANCE-FORCE (K-F) que l'on étudie les modifications éventuelles des propriétés élastiques du muscle, suite à l'entraînement.

La compliance exprime l'extensibilité du muscle.

La compliance-série est mesurée au cours des mouvements de "QUICK-RELEASE" (Q.R.) de flexion.

I - DESCRIPTION DES ENREGISTREMENTS

Un mouvement de Q.R. consiste à demander au sujet un effort isométrique de flexion. Durant cet effort, et à l'insu du sujet, l'expérimentateur libère instantanément l'avant-bras qui décrit alors un mouvement de flexion limité par les activités des fléchisseurs et des extenseurs.

A- MECANOGRAMMES

La figure -27- présente un mouvement de Q.R.

- Le tracé du couple (C) montre que la force est constante au moment du déclenchement. La déviation AC, au moment du déclenchement permet de calculer les valeurs du couple et de la force isométrique, à partir des équations de la figure 15.

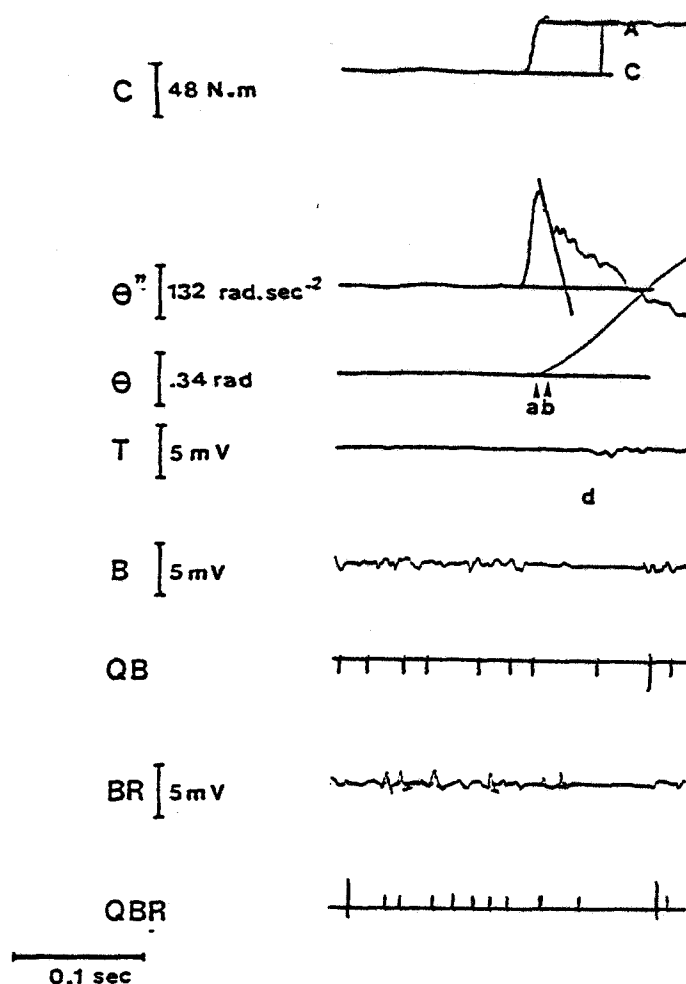


Figure -27- Mouvement de Quick Release

c = tracé du couple isométrique

Θ'' = accélération angulaire

Θ = déplacement angulaire

T = EMG du triceps

B et BR = EMG des biceps et brachio radialis

QB et QBR = EMG_i des biceps et brachio radialis
(explications dans le texte).

- Le tracé de l'accélération (θ'') présente une phase de croissance quasi-instantanée pour atteindre l'accélération maximale lors du déclenchement du mouvement.

La décroissance s'établit ensuite en deux phases : la première, très rapide pendant laquelle on mesure la variation de force ; la seconde, plus lente, jusqu'à l'apparition du freinage marqué par le passage du tracé de l'accélération sous la ligne du zéro.

- Le tracé du déplacement (θ) permet de calculer la variation de longueur du muscle, correspondant à la variation de force.

La compliance est mesurée entre les deux flèches a et b.

B- ELECTROMYOGRAMMES

- Les tracés des BB et BR montrent une période d'inactivité qui s'installe environ 40 msec après le déclenchement. Ce phénomène a été décrit par ANGEL et coll. (1965) sous le terme de réflexe d' "unloading"

- Le tracé du triceps (T) ne présente pas ou peu d'activité pendant la contraction isométrique des fléchisseurs. Environ 50 msec après le déclenchement, apparaît le réflexe d'étirement, marqué par une bouffée électromyographique (d).

C- CRITERES DE VALIDITE DES ENREGISTREMENTS

- Le niveau du couple doit être maintenu constant avant le déclenchement du mouvement

- Le tracé de l'accélération doit présenter un front de montée rapide et régulier.

II - RESULTATS.

A- DESCRIPTION DE LA RELATION

La figure -28 - présente la relation K-F établie pour le groupe d'entraînement isométrique.

Afin de pouvoir regrouper les résultats individuels, les valeurs de la compliance et de la force ont été normalisées.

La compliance est normalisée par rapport à F_0 (Force maximale isométrique à 75° mesurée le jour du test) et par rapport à l_0 (longueur du F.E. à 75°).

La force est normalisée par rapport à F_0 .

$$\text{Ainsi } K \text{ normalisée} = K \frac{F_0}{l_0}$$

$$F \text{ normalisée} = \frac{F}{F_0}$$

Les points décrivent une relation curvilinéaire où la compliance est une fonction inverse de la force.

On note une diminution rapide de la compliance jusqu'aux valeurs de 0,3 à 0,4 F/F_0 . La diminution est ensuite plus lente jusqu'à la force de contraction isométrique maximale.

B- CHOIX DU MODELE DE REPRESENTATION GRAPHIQUE

Les résultats ont été ajustés, par la méthode des moindres carrés, à plusieurs équations mathématiques. Parmi les modèles testés, la fonction puissance ($K = a F^b$) est celle qui s'ajuste avec les meilleurs coefficients de corrélation. C'est également celle dont la représentation s'ajuste le mieux aux points expérimentaux.

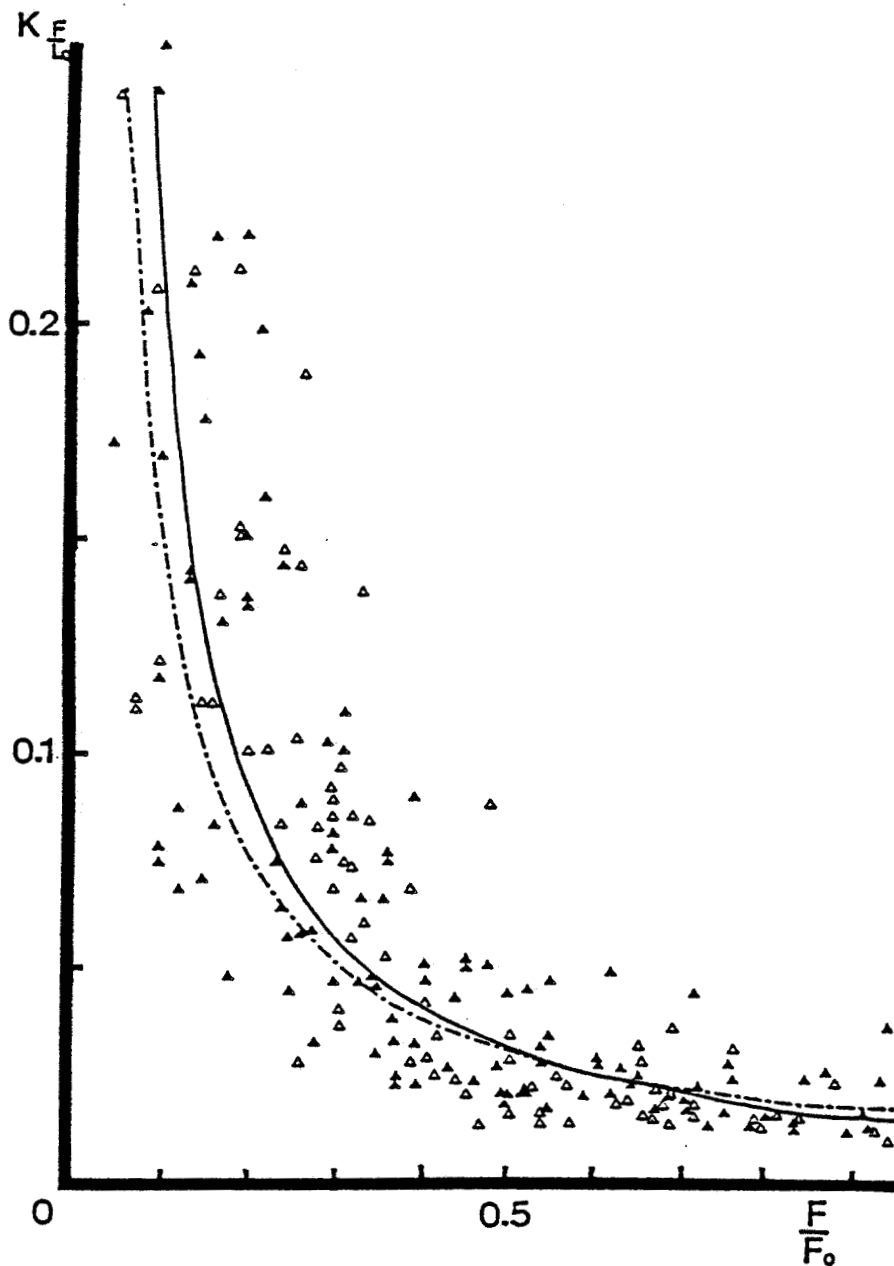


Figure -28- Relation Compliance - Force

Regroupement des données du groupe d'entraînement isométrique.

Compliance est normalisée par rapport à F_0 ($F_{\max}$ ISO à 75° du jour du test) et à l_0 (longueur du F.E. à 75°)

Force est normalisée par rapport à $F_{\max}$ ISO à 75° du jour du test

Les symboles évidés sont ceux de la relation avant entr.

Les symboles pleins sont ceux de la relation après entr.

En continu : relation avant entraînement

En tiret-point : relation après entraînement

C- EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT SUR LES RELATIONS

Les résultats sont regroupés par type d'entraînement et sont normalisés.

Les relations sont présentées en doubles coordonnées logarithmiques sur la figure -29-. Ces relations, ainsi linéarisées, permettent de mieux apprécier les zones de recouvrement avant et après entraînement.

A partir de $0,4 - 0,5 F_0$, les valeurs de la compliance avant et après entraînement sont très proches. Par contre, l'entraînement semble avoir des effets plus marqués aux faibles niveaux de force.

L'entraînement concentrique aboutit à une augmentation de la compliance série, alors que les entraînements isométrique et excentrique aboutissent à une diminution de la compliance-série.

Le test "t" de STUDENT, qui compare les pentes des relations, indique que la différence est significative pour les groupes d'entraînement isométrique ($P < 0,05$) et concentrique ($P < 0,01$). La différence n'est pas significative pour les groupes témoin et d'entraînement excentrique.

On remarquera cependant que pour ce dernier type d'entraînement, la compliance après entraînement est toujours plus faible, qu'avant l'entraînement, quelle que soit la tension isométrique développée.

III - DISCUSSION

Elle s'articulera autour de deux pôles. L'un portera sur la technique du Q.R. et l'autre sur l'analyse des résultats enregistrés.

A- ANALYSE CRITIQUE DE LA TECHNIQUE DE QUICK-RELEASE

1- Recueil des données

Dans la technique de Q.R. utilisée pour mesurer la compliance, les valeurs de force et de longueur du F.E. sont calculées à partir des tracés du déplacement angulaire (longueur du F.E.) et de l'accélération

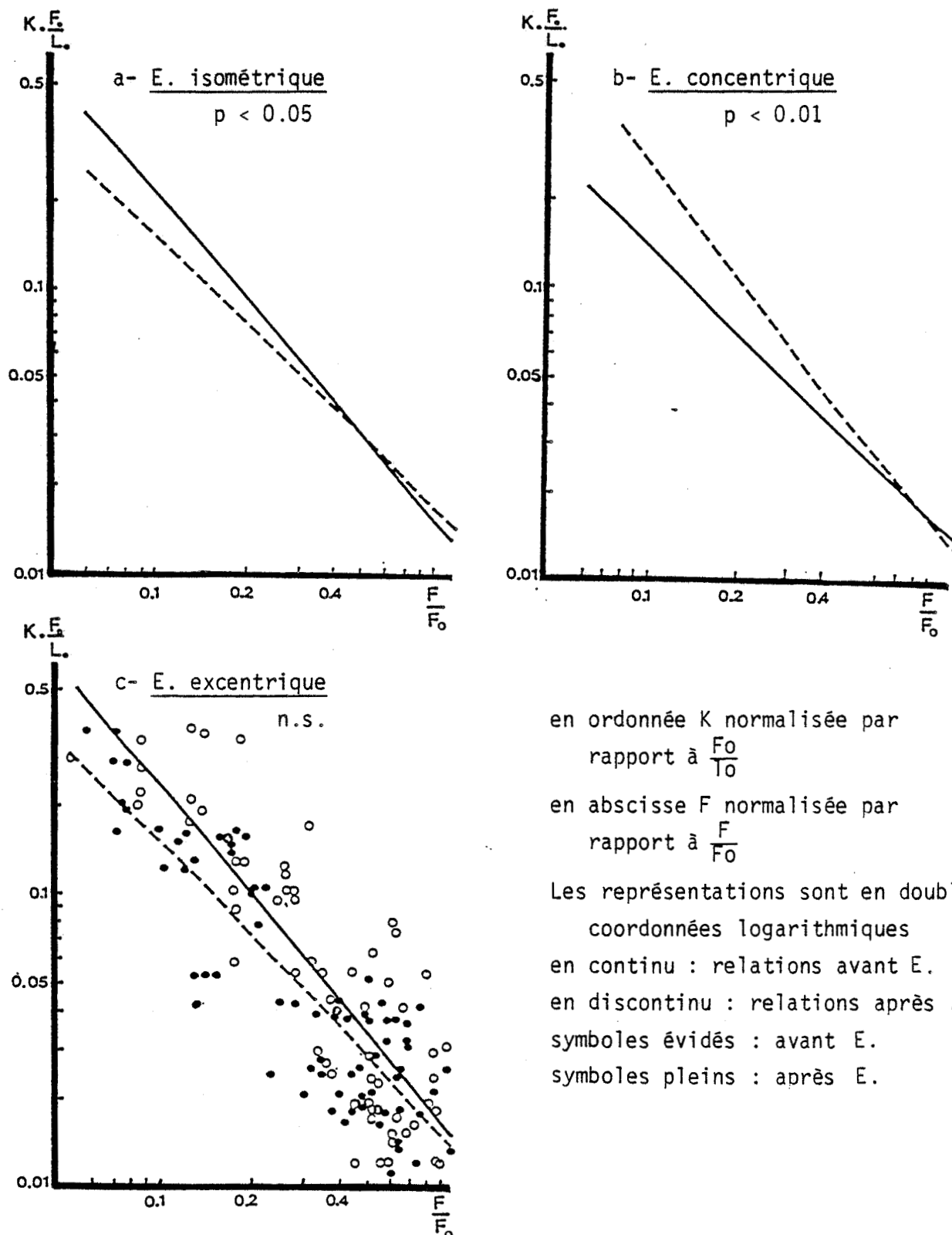


Figure -29- Relations Compliance - Force avant et après entraînement.

angulaire (force du F.E.). Les capteurs présentent un temps de réponse qui pourrait influencer sur la détermination des niveaux de force et sur la longueur du F.E.

Compte tenu des caractéristiques des capteurs, des chaînes d'amplification et de l'enregistreur, on peut considérer que :

- les signaux de déplacement ne sont limités que par le temps de réponse de l'enregistreur

- les signaux d'accélération ne sont limités que par les caractéristiques du capteur.

Dans tous les cas, la réponse des chaînes de mesure est linéaire jusqu'à une fréquence de 450 hertz.

Compte tenu de la vitesse d'enregistrement, le temps de réponse des chaînes ne peut donc introduire qu'un temps de montée non visible sur la mesure de la force et de la longueur.

De plus, les conditions de mesure standardisées de la compliance lors des deux tests permettent l'analyse comparative des relations compliance - force, avant et après entraînement.

2- Limites de la technique de mesure de K par le Q.R.

GOUBEL (1974) précise que la mesure de la compliance porte sur la phase de détente de la CES. Cette phase est très brève (≈ 5 msec) sur le muscle isolé, elle est prolongée jusqu'à 40-50 msec dans les conditions de mesure in situ.

In situ, la variation de longueur du muscle est de l'ordre de 1,4%, alors que sur le muscle isolé elle est généralement comprise entre 2% (JEWELL et WILKIE 1958) et 6% (MASHIMA et coll. 1972).

Si l'augmentation de la durée de la détente élastique et la diminution de la variation de longueur n'ont pas d'effet direct sur la mesure de la compliance série, HILL (1949) pense qu'elles peuvent éventuellement permettre un réétirement de la C.C. entraînant de ce fait, une sous-estimation de la variation de longueur de la CES, donc de la compliance. Ce phénomène se produirait surtout pour les faibles valeurs de force, pour lesquels le niveau d'activation n'est pas maximal.

De plus, pour les faibles valeurs de la force, on peut également penser que les résultats de compliance du F.E. sont influencés par la présence des muscles antagonistes. Même si ceux-ci présentent une activité électrique la plus faible possible, leur élasticité parallèle peut alors interférer avec la mesure de la compliance-série des fléchisseurs.

On ne pourra donc mesurer la compliance, par la méthode de Q.R., qu'à la condition d'avoir des niveaux suffisamment élevés de couple isométrique.

Nos mesures n'ont jamais été faites pour des forces inférieures à 100 N, ce qui réduit les effets parasites de l'élasticité parallèle des extenseurs.

Pour toutes ces raisons, les mesures de ΔF et de Δl ont toujours été effectuées avant l'apparition du réflexe d'unloading et du réflexe d'étirement.

Il apparaît donc que la technique de Q.R. utilisée pour étudier la relation compliance-force peut témoigner des éventuelles modifications des propriétés élastiques du muscle par l'entraînement.

B - DISCUSSION DES RESULTATS

1- Compliance et vitesse de contraction

Les entraînements isométrique et excentrique entraînent une diminution de la compliance, tandis que l'entraînement concentrique entraîne une augmentation de la compliance. Ces résultats sont un élément

explicatif des modifications, de la vitesse de contraction, par l'entraînement (voir figures -24- et -25- et tableau n° XV).

WILKIE (1950) constate que la V_C augmente quand la compliance diminue et inversement. Par ailleurs, une étude théorique du modèle à deux composantes de HILL aboutit aux mêmes conclusions. Pour ce qui est de nos résultats, la comparaison des effets de l'entraînement sur la compliance série et sur la vitesse de contraction vérifie cette analyse théorique. En effet, l'entraînement anisométrique excentrique entraîne une diminution de la compliance et une augmentation de la vitesse de contraction, alors que l'entraînement anisométrique concentrique entraîne une augmentation de la compliance et une diminution de la vitesse de contraction.

Seul l'entraînement isométrique apporte des résultats contradictoires. La compliance diminue tandis que les V_C ANISO et ISO évoluent en sens inverse. La diminution de V_C ISO, paradoxale au regard des résultats de V_C ANISO et de la compliance série, nous amène à penser que l'entraînement isométrique induit un recrutement plus progressif des U.M. L'augmentation du temps de recrutement, permettrait un recrutement plus important d'U.M. qui conduirait à une augmentation de la force maximale isométrique.

2- Compliance et restitution d'énergie

L'intérêt de l'étude de la compliance élastique série, réside surtout dans celle du stockage et de la restitution d'énergie potentielle élastique.

CAVAGNA et coll. (1968), MARGARIA (1976) montrent que le travail positif accompli par le muscle lors de contractions maximales est toujours plus important quand ce muscle a été préalablement étiré que lorsqu'il se raccourcit à partir d'un état de contraction isométrique. Il est donc vraisemblable que l'énergie stockée pendant la phase d'étirement est restituée au cours de la phase de raccourcissement et vient s'ajouter, du moins en partie, à l'énergie du travail positif qui suit l'étirement.

CNOCKAERT (1972), CNOCKAERT et GOUBEL (1975) montrent que le stockage d'énergie potentielle permet une dépense énergétique moindre quand le travail positif est précédé d'un travail négatif. La dépense énergétique est ici appréciée à partir d'une étude électromyographique.

CAVAGNA et coll. (1971) étudient la course à vitesse croissante. Ils montrent que plus la vitesse de déplacement est importante, plus la différence entre le travail réalisé et la part revenant au travail positif est importante.

Ils concluent à une possibilité d'utiliser l'énergie potentielle élastique stockée pendant la phase initiale du mouvement qui est caractérisé par une contraction musculaire excentrique, lors de la pose du pied au sol.

ASMUSSEN et BONDE-PETERSEN (1974), BOSCO et coll. (1981), montrent que la puissance mécanique développée dépend de l'amplitude et de la vitesse de l'étirement.

Le rendement musculaire est assurément associé aux modalités des contractions musculaires qui interviennent dans la réalisation des gestes. L'entraînement sportif qui cherche à améliorer les performances des athlètes doit donc s'intéresser à l'analyse technique des gestes, mais également aux techniques d'entraînement qui permettraient d'améliorer les capacités de travail du muscle. Dans l'état actuel de nos travaux, nous pouvons dire que les entraînements isométrique et excentrique qui aboutissent à une diminution de la compliance, permettraient une meilleure transmission de la force, surtout lorsque le niveau des contractions musculaires est sous-maximal.

3- Compliance-Force et entraînement concentrique

Pour LENSEL et VIGREUX (1982), la fatigue augmente la compliance série du muscle. On pourrait attribuer cette augmentation de la compliance à la réduction de la force musculaire. Or le groupe qui s'est entraîné en concentrique augmente sa compliance après entraînement. Il présente,

en outre, une diminution des performances maximales de force de contraction dans les mouvements dynamiques ($1570 \text{ N} \pm 284$ avant entraînement et 1420 ± 81 après entraînement).

Dès lors, on peut se demander si l'augmentation de compliance, associée à la diminution de la force de contraction, représente un phénomène durable, lié à l'entraînement ou un phénomène transitoire lié à la fatigue musculaire.

BIGLAND et LIPPOLD (1954) sur les muscles jumeaux du membre inférieur, ASMUSSEN (1953), en référence à un travail généralisé sur bicyclette ergométrique, montrent que le travail concentrique est plus coûteux que le travail excentrique. On peut alors penser que la récupération de la capacité de travail est plus longue après l'entraînement concentrique qu'après l'entraînement excentrique. De ce fait, la période de 48 heures séparant la dernière séance d'entraînement et la séance test aurait pu être trop courte pour le groupe d'entraînement concentrique.

Cependant, les résultats enregistrés au cours de plusieurs tests ne semblent pas vérifier l'hypothèse de la fatigue. En effet, on note une amélioration des performances isométriques ($P < 0,01$) accompagnée d'une augmentation du recrutement en contraction maximale. Par conséquent, l'augmentation de la compliance, la diminution de la force maximale dynamique et la diminution de V_C ISO 20-80 et V_C ANISO, sont vraisemblablement dues à des modifications des propriétés mécaniques liées au mode d'entraînement concentrique.

En conclusion, il apparaît que l'entraînement modifie les propriétés élastiques du muscle de façon différente selon les types de contraction musculaire utilisés pendant les séances.

L'entraînement concentrique augmente la compliance, tandis que les entraînements isométrique et excentrique la diminuent.

Cette diminution aurait pour effet d'assurer une meilleure transmission des forces développées pendant la phase initiale du mouvement, surtout pour des tensions sub-maximales. Etant donné que la compliance n'est pratiquement pas modifiée pour des tensions supérieures à $0,5 F/F_0$, nous ne pouvons expliquer le gain des performances, en tension maximale, que par l'amélioration de la force contractile et/ou des modifications de la commande motrice.

Les entraînements concentriques permettraient un stockage plus important d'énergie potentielle élastique, en relation avec l'augmentation de la compliance.

PROPRIETES CONTRACTILES

=====

Lors des contractions musculaires, les tensions développées par l'élément contractile, permettent le maintien d'une attitude ou la réalisation d'un mouvement.

Les contractions musculaires sont alors isométriques ou anisométriques.

Nous étudierons les propriétés contractiles du muscle en contraction isométrique et anisométrique-concentrique, c'est-à-dire pour des contractions musculaires non suivies de modification de longueur et pour des contractions musculaires en raccourcissement.

I - <u>CONTRACTION ISOMETRIQUE</u>	95
A - RELATION COUPLE-ANGLE	95
1- Enregistrements	95
a) Mécanogrammes	95
b) Tracés électromyographiques	95
c) Critères de validité des résultats	96
2- Résultats	96
a) Etude des relations C-A	96
b) Etude des modifications des relations	98
B - RELATION FORCE - LONGUEUR	100
1- Description	100
2- Résultats	101
a) Etude des modifications des relations F-L	101
b) Etude des gains de force	101
C - DISCUSSION	104
1- Aspects méthodologiques	104
2- Aspects physiologiques	106
3- Sélectivité de l'entraînement	107
II - <u>CONTRACTION ANISOMETRIQUE</u>	108
A - RELATION FORCE - VITESSE	109
1- Description des enregistrements	109
a) Mécanogrammes	109
b) Electromyogrammes	109
c) Critères de validité du mouvement	110
2- Résultats	110
a) Etude des relations	112
b) Vitesse de raccourcissement pour un pourcentage de F MAX	112

B - RELATION PUISSANCE - FORCE	116
1- Description des relations	117
2- Résultats	117
C - DISCUSSION	120
1- Aspects méthodologiques	120
a) Niveau d'activation	120
b) Choix de la plage représentative du mouvement	120
c) Pondération des résultats	121
2- Discussion des résultats	122
a) Rapport a/F_0	122
b) Relation P-V et F-V	123
- Relation P_{max} : cas de la P MAX	123
- Relation F-V. et puissance	124
c) Utilisation en activité physique et sportive	125

I - CONTRACTION ISOMETRIQUE

L'activité mécanique des muscles ou des groupes musculaires en contraction isométrique se traduit, au niveau de l'articulation, par le développement d'un couple dont la valeur dépend de l'angle articulaire.

D'une relation couple-angle, on peut exprimer une relation force-longueur.

A - RELATION COUPLE-ANGLE (C-A.)

1- Enregistrements

La figure - 23- représente l'enregistrement d'un effort isométrique maximal volontaire.

a) *Mécanogrammes*

α Couple

Le couple (C) est calculé à partir de la déviation AB du tracé ; il atteint sa valeur maximale de façon progressive : on observe d'abord une montée rapide qui atteint 70% à 80% de sa valeur maximale en $144 \text{ msec} \pm 83 \text{ msec}$, puis une croissance plus lente jusqu'à un plateau atteint en $524 \text{ msec} \pm 260 \text{ msec}$.

β Déplacement (θ)

Le tracé plat du déplacement montre que la contraction est isométrique.

b) *Tracés électromyographiques*

α Triceps (TB)

L'activité du triceps est réduite. Il s'agit d'un très léger niveau de contraction, classiquement observé dans ce type d'effort.

β Biceps et brachio-radialis (BB et BR)

Les enregistrements des EMG des biceps et brachio-radialis sont d'amplitude constante. Le biceps, sur ce tracé, entre en activité environ 10 msec avant le brachio-radialis. Cette anté-position du biceps sur le brachio-radialis est observée sur chaque enregistrement, pour tous les angles de l'articulation.

c) Critères de validité des mouvements

Deux contractions par sujet sont demandées à chaque angle, nous retenons le mouvement pour lequel :

- les EMG du biceps et du brachio-radialis sont les plus amples et réguliers
- Les EMGi des mêmes muscles sont constants
- L'EMG du triceps est très faible par rapport à ceux des fléchisseurs.

Le couple est constamment croissant, jusqu'à atteindre le plateau qui est maintenu jusqu'à l'arrêt du mouvement.

2- Résultats

a) Etude des relations couple-angle

L'examen de la figure n° 30 montre que la relation C-A se présente sous la forme d'une courbe à maximum. Les couples les plus faibles sont développés pour des angles de 30° et les couples maximaux, pour un angle compris entre 75° et 105°.

L'entraînement ne modifie pas l'allure générale des relations C-A. Toutefois l'angle de couple maximal peut se déplacer légèrement.

Après entraînement isométrique, le couple maximum est obtenu pour les angles de 90° et 105°.

Après entraînement concentrique, le couple maximum est obtenu pour 105°.

Après entraînement excentrique, le couple maximum est maintenu à 90°, mais le couple est proche de cette valeur pour l'angle de 75°.

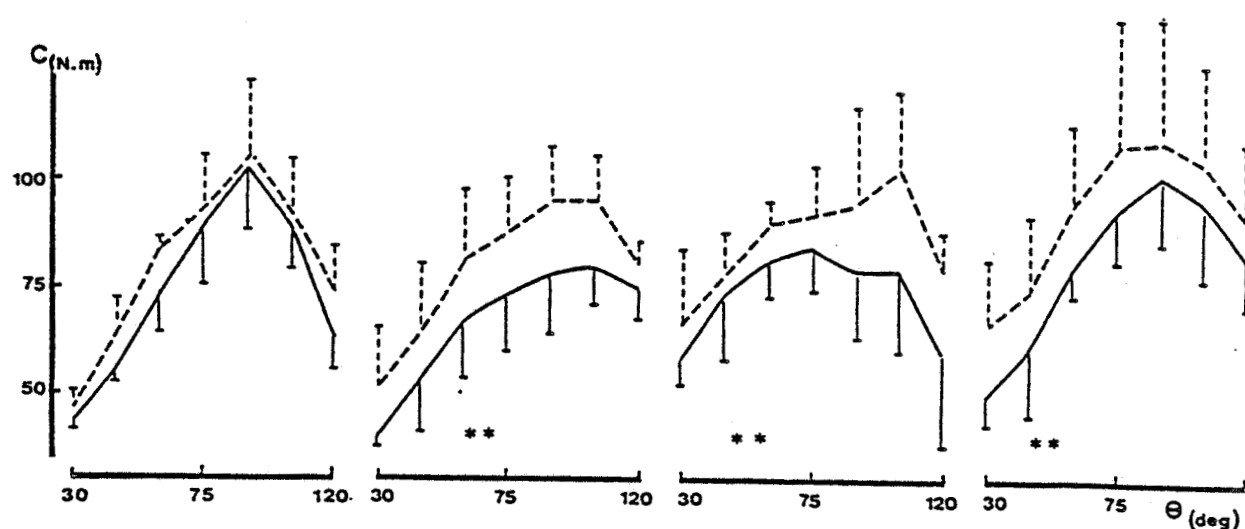


Figure -30- Relations Couple - Angle

Couple en Newton par mètre

Angle (θ) en degré

Les écarts-type sont figurés sur les tracés

** différence significative $P < 0,01$

De la gauche vers la droite : non entraînés, entraînements
ISO, CONC, EXC

en continu : relation avant entraînement

en discontinu : relation après entraînement

b) Etude des modifications des relations

A partir des résultats de la figure 30, on a étudié les gains en pour cent pour chaque angle de l'articulation. Ce gain est calculé, par modalité d'entraînement, pour chaque angle de l'articulation. Le tableau XVII rassemble les gains moyens par modalité d'entraînement. On constate que l'entraînement élève significativement les valeurs de couples maximaux.

	MODALITES D'ENTRAINEMENT			
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE	TEMOIN
GAINS MOYENS en pour cent	28.92	18.99	15.64	3.33
Ecart-type	8.50	10.24	8.2	9.37
Degré de signification	P < 0,01	P < 0,01	P < 0,01	ns

TABLEAU n° XVII : VALEURS MOYENNES DES GAINS DE COUPLE.

Ce résultat global et l'étude des relations C-A obtenues lors des tests 1 et 2, nous amènent à étudier de façon précise les modifications enregistrées pour chaque angle de l'articulation.

La figure -31- montre les gains obtenus pour chaque angle étudié.

L'entraînement isométrique est de façon générale plus efficace que les entraînements anisométriques. L'analyse de variance par un test statistique non paramétrique (KRUSKAL et WALLIS), nous indique un seuil de signification : $P < 0,01$.

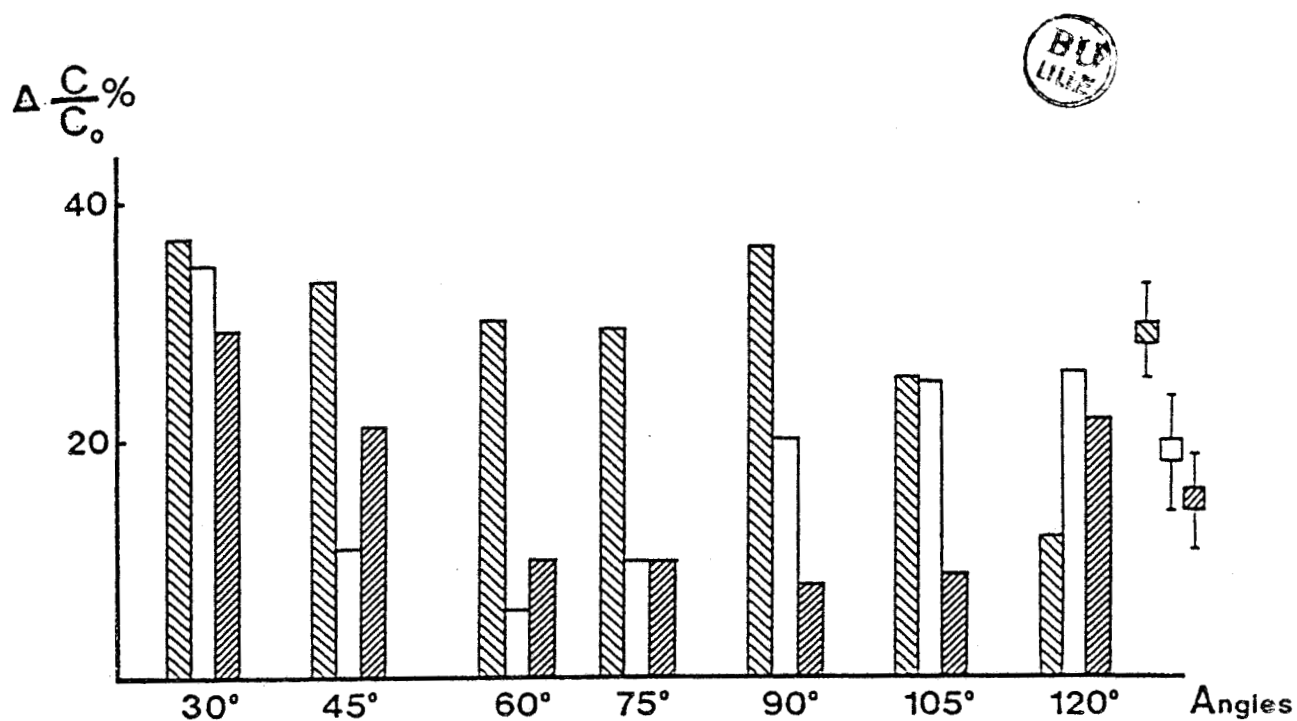


Figure -31- Gains de couple isométrique pour les différents angles de l'articulation en fonction de l'entraînement

Gain en pour cent de $\frac{C(\text{test 1}) - C(\text{test 2})}{C(\text{test 1})}$

-  E. isométrique
-  E. Concentrique
-  E. Excentrique

Les gains moyens sont représentés par les symboles carrés.

Après entraînement isométrique, les gains ont tendance à diminuer au fur et à mesure que l'angle de l'articulation augmente. Toutefois à 90°, qui est l'angle auquel se sont exercés les sujets du groupe, on observe un gain plus important du couple isométrique.

L'efficacité de l'entraînement concentrique est supérieure à celle de l'entraînement excentrique pour les angles ouverts de l'articulation (90, 105, et 120°). Pour les angles inférieurs à 75°, on observe l'inverse. Les gains sont identiques à 75°.

On remarquera toutefois que quelle que soit la modalité choisie pour l'entraînement, le gain le plus important est observé pour l'angle de 30°, l'angle de 90° constitue également un angle privilégié après entraînement isométrique.

B- RELATION FORCE - LONGUEUR (F-L.)

1- Description

La force croît avec la longueur du muscle (figure -7-). A partir d'une certaine longueur, une force passive croît exponentiellement en fonction de l'étirement. Cette tension vient s'ajouter à la tension exercée par la CC. Il s'agit d'une tension élastique parallèle localisée au niveau du sarcolemme et du tissu conjonctif (CASELA 1951). Il faut donc ajouter une composante élastique parallèle (CEP) au modèle de muscle initial (HILL 1938) de la figure -6-. Nous obtenons ainsi un modèle à 3 composantes (figure - 32-).

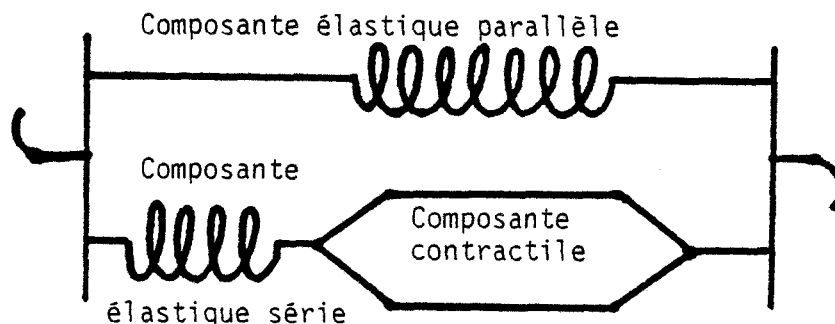


Figure -32- : MODELE DE MUSCLE A TROIS COMPOSANTES d'après BAHLER (1968)

2- Résultats (figure -33-)

De façon générale, on note une plage pour laquelle la force évolue peu, de 92.5 à 103 pour cent de l_0 (longueur à 75°). La relation présente un pseudo-plateau dans cette plage. Au-delà de cette longueur, la force croît rapidement.

a- Etude des modifications des relations F-L.

L'entraînement améliore le niveau de force du muscle pour toutes les longueurs. L'allure générale des relations est peu modifiée, mais il n'y a pas simple translation.

- Après entraînement isométrique, on note des progrès en force surtout pour des longueurs supérieures à 103 pour cent de l_0 .

- L'entraînement excentrique fait progresser la force, surtout pour les longueurs supérieures à l_0 . A partir de cette valeur, les écarts entre la force avant et après entraînement sont plus importants.

- Après l'entraînement concentrique, les gains semblent plus importants aux longueurs extrêmes.

b- Etude des gains de force

Le tableau n° XVIII présente les pourcentages de gain aux différentes longueurs du muscle. Ils sont calculés à partir des valeurs reportées sur la figure - 33 -. Ils représentent les valeurs de

$$\frac{F_{\text{après}} - F_{\text{avant}}}{F_{\text{avant}}} \times 100.$$

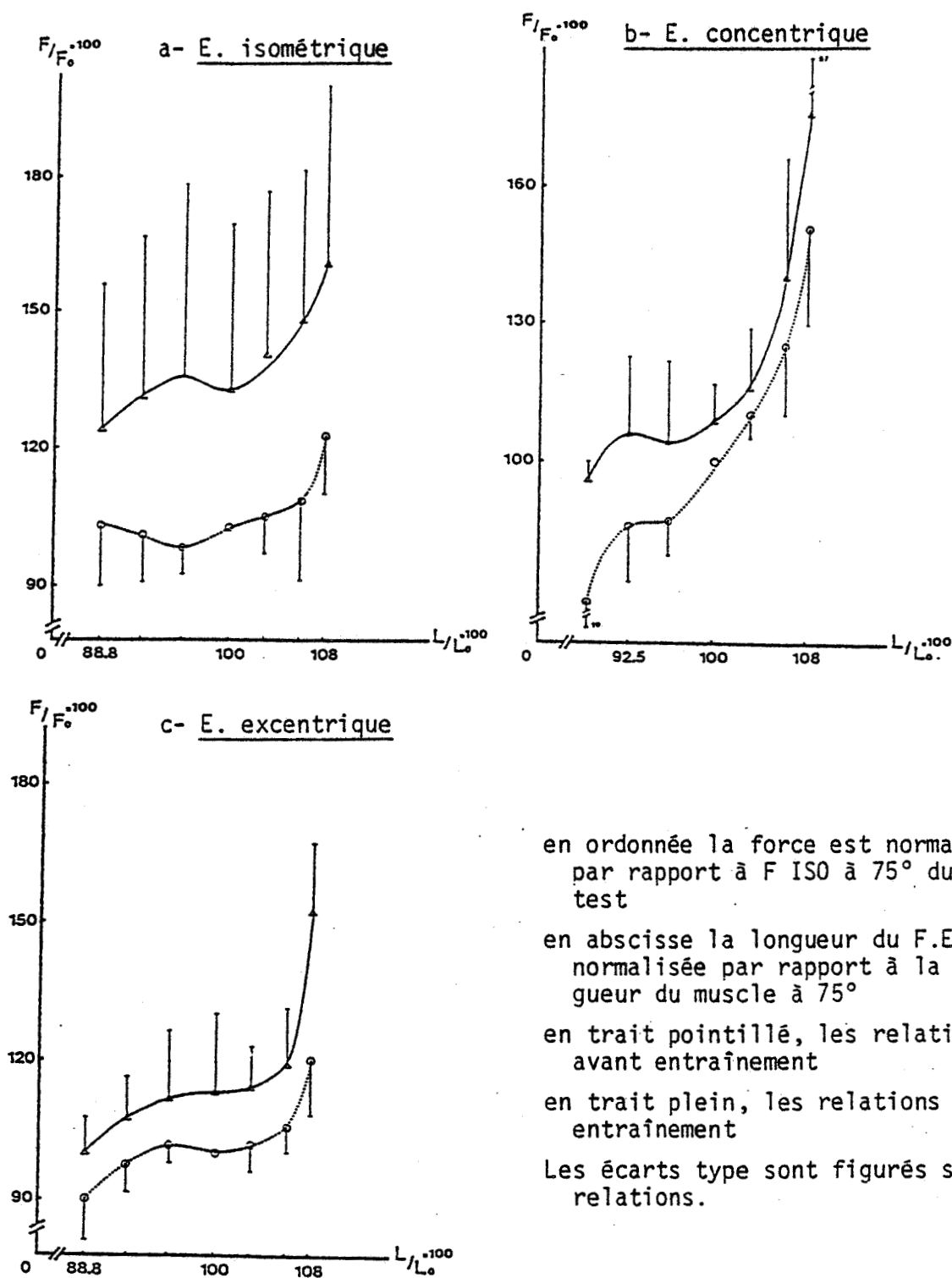


Figure -33- Relations F.L. avant et après entraînement.

ANGLES (degrés)	120	105	90	75	60	45	30	
$L/L_0 \times 100$	88,9	92,5	96	100	103	106	109	$\bar{m} \pm s$
E. ISOMETRIQUE	20,4	23,3	41,6	33	33,3	39	27	$31 \pm 7,9$
E. CONCENTRIQUE	39,7	29,2	19,2	9	5,4	12	16,5	$18,7 \pm 12,34$
E. EXCENTRIQUE	12,3	10,2	10,7	13	12,2	13,3	27,7	$14,2 \pm 6$

TABLEAU n° XVIII : GAIN DE FORCE EN POUR CENT EN FONCTION DE LA
LONGUEUR DU MUSCLE

En moyenne, la force isométrique est davantage améliorée après entraînement isométrique qu'après entraînement anisométrique.

Après entraînement isométrique, le gain est maximal pour l'angle d'entraînement qui est de 90°.

Après entraînement concentrique, le gain de force est plus important pour les faibles longueurs du muscle.

Après entraînement excentrique, les progrès semblent plus réguliers avec cependant un gain plus important pour les grandes longueurs du muscle.

On s'aperçoit donc que les entraînements anisométriques procurent les gains les plus importants pour les plages angulaires qui correspondent à la fin du mouvement d'entraînement. C'est pour ces angles que les efforts étaient subjectivement ressentis comme maximaux.

C- DISCUSSION

Les relations C-A. et F-L. obtenues sont calculées sur la base du concept du fléchisseur équivalent, qui permet de représenter l'ensemble bras - avant-bras - fléchisseurs du coude comme un triangle déformable dont la longueur variable est constituée par le biceps courte portion. La configuration anatomique de la trochlée humérale nous engage à discuter les modifications des relations sur la base des limites de validité du modèle articulaire d'une part, sur le travail imposé pendant l'entraînement d'autre part.

Nous distinguerons les aspects méthodologiques et les aspects physiologiques.

1- Aspects méthodologiques

L'angle de 30° constitue une limite à l'étude de la relation F-L., à cause de la trochlée humérale qui constitue une poulie de renvoi du tendon distal du biceps.

De ce fait, les valeurs très importantes de la force pour cet angle du coude sont peut-être faussées et les écarts constatés après la période d'entraînement seraient également amplifiés.

L'étude des rapports entre les niveaux de force avant et après entraînement, pour toutes les longueurs du muscle de façon à limiter les erreurs liées à l'utilisation du modèle triangulaire de l'articulation du coude et des fléchisseurs, confirme celle des résultats de gain de force (tableau n° XVIII) et celle des résultats de gain de couple (figure -31-). Il ne s'agit donc pas d'un problème de méthode.

Nous devons alors remarquer que les entraînements anisométriques présentent un gain privilégié dans deux zones angulaires.

Une première zone est celle qui correspond à la fin du mouvement d'entraînement. La deuxième zone est celle de l'angle de 120° pour l'entraînement excentrique et de 30° pour l'entraînement concentrique. Ce

sont les angles qui débutent le mouvement d'entraînement, c'est-à-dire pour la phase du mouvement qui correspond à une contraction isométrique.

On remarque donc l'influence spécifique du travail isométrique sur le développement de la force isométrique.

Cette spécificité du travail isométrique sur le développement de la force isométrique se vérifie sur l'ensemble des relations F-L. et C-A. du groupe d'entraînement isométrique. L'angle d'entraînement de 90° qui obtient les gains les plus importants confirme la spécificité de l'angle d'entraînement sur le développement de la force isométrique.

Ces résultats sont en accord avec ceux de GARDNER (1962) ZACIORSKI et RAJCIN (1975), LINDH (1979) et THEPAUT-MATHIEU (1984). Nos résultats, du fait des protocoles expérimentaux, ne permettent cependant pas de vérifier que la spécificité de l'entraînement isométrique est d'autant plus évidente que le travail est réalisé par un muscle en position raccourcie, comme l'ont montré ZACIORSKI et RAJCIN (1975), et THEPAUT-MATHIEU (1984).

Il se pourrait que ces modifications particulières, liées au caractère isométrique de la contraction musculaire, s'expliquent par une modification de la commande. THEPAUT-MATHIEU (1984) observe que l'augmentation de l'EMGi, après entraînement isométrique, est plus importante pour l'angle d'entraînement, qui est l'angle qui recueille également le gain maximum de couple et de force.

Cette hypothèse va également dans le sens de la modification du recrutement des U.M. après une période d'entraînement selon DAVIES et Mc GRATH (1982).

Nous avons montré que le niveau de recrutement n'est pas en relation avec l'angle de l'articulation. Mais si l'on observe le classement obtenu pour les différents angles, on s'aperçoit (tableau n° XIX)

qu'après les entraînements anisométriques, le recrutement est maximum pour les angles qui débutent le mouvement d'entraînement, c'est-à-dire pour les angles de 30° après entraînement concentrique et 120° après entraînement excentrique.

	TYPES D'ENTRAÎNEMENT		
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
ANGLES DE TRAVAIL ISOMETRIQUE	90°	30°	120°
CLASSEMENT DES VALEURS DE RECRUTEMENT APRES ENTRAÎNEMENT	3	1	1
PROGRESSION EN PLACES DES ANGLES DE TRAVAIL ISOMETRIQUE	2	3	6

TABEAU n° XIX : EFFET DE L'ANGLE DE TRAVAIL ISOMETRIQUE SUR EMGi

L'entraînement isométrique permet à l'angle d'entraînement de progresser de la 5ème à la 3ème place quant au recrutement.

On montre alors l'effet spécifique de l'angle d'entraînement isométrique sur le développement de la force et sur le recrutement.

2- Aspects physiologiques

TABARY et coll. (1972) montrent que l'aspect différent des relations F-L. est principalement dû à la longueur de l_0 . TABARY et coll. (1976) mettent en relation le nombre de sarcomères, par fibre musculaire, et la relation C-A. Ils montrent que plus le nombre de sarcomères est important, plus le sommet de la courbe est large. Pour MARECHAL et CASTEELS (1976), la teneur du muscle en structures élastiques parallèles détermine en partie l'aspect de la relation Force - Longueur.

Sur cette base, on peut supposer que le nombre de sarcomères des fibres musculaires est lié à la longueur des muscles, donc à la taille des sujets. La différence de taille des sujets permet d'expliquer la grande variabilité des relations F-L. et C-A. individuelles avant entraînement.

La longueur de l'avant-bras des sujets et la largeur de la relation C-A. prise à 90% du couple maximum sont en effet en bonne correspondance.

Par contre, le temps d'immobilisation des muscles à leur longueur de travail, en isométrie, ne nous permet pas de formuler l'hypothèse que l'élargissement des sommets des courbes C-A. soit lié à un "ajustement du nombre des sarcomères de la fibre musculaire à la longueur qui lui est imposée" (TARDIEU et coll. 1973).

Il faut donc penser que les progrès sont dus à une meilleure coopération des U.M. lors des contractions. L'amélioration de la coordination étant spécifique des angles de travail, tant en isométrie qu'en anisométrie. C'est-à-dire à 90° après entraînement isométrique et pour les angles de fin de mouvement après entraînement anisométrique. La spécificité est encore marquée pour les angles qui débutent les mouvements excentriques et concentriques.

3- Sélectivité de l'entraînement

Les relations C-A. sont étudiées sur la base de la géométrie musculo-squelettique du biceps en tant que fléchisseur équivalent. Or, la flexion du coude est réalisée grâce à l'intervention principale de 3 muscles dont les niveaux de coopération peuvent être différents d'un individu à un autre et selon les angles auxquels le travail est effectué. Ainsi le geste d'entraînement pourrait entraîner des modifications musculaires plus marquées pour le biceps, ou le brachialis, ou le brachio-radialis selon les sujets et selon le type de mouvement réalisé à l'entraînement. Les écarts-type, recueillis pour les valeurs

de couple, plus importants après entraînement, correspondraient à une individualisation des effets de l'entraînement sur les muscles du groupe des fléchisseurs du coude.

En résumé, les progrès de force et de couple isométriques sont plus importants après entraînement isométrique, ou pour la phase isométrique des mouvements anisométriques. On s'aperçoit donc qu'en ce qui concerne l'entraînement isométrique, il y a une spécificité marquée des effets de l'entraînement isométrique lorsque le contrôle s'effectue en isométrie.

A travers la relation F-V., nous rechercherons si la spécificité de l'anisométrie est également observée lorsque la force s'exerce dans des contractions anisométriques-concentriques.

II - CONTRACTION ANISOMETRIQUE

Dans un mouvement anisométrique maximum, la force de contraction (F) et la vitesse de raccourcissement (V) du muscle sont liées par une relation curvilinéaire. Dans un mouvement contre une inertie, la vitesse atteint progressivement une valeur maximale pendant que la force diminue. La valeur de la force maximale est obtenue dans un mouvement contre une inertie infinie, tandis que la vitesse maximale s'obtient contre une inertie nulle.

Les cinq inerties utilisées permettent d'explorer l'ensemble de la relation.

Les relations qui existent entre les valeurs instantanées, de force et de vitesse d'une part, de puissance et de force d'autre part, sont étudiées avant et après une période d'entraînement.

A- RELATION FORCE-VITESSE

1- Description des enregistrements (figure -22-).

a) Mécanogrammes

- θ est le tracé du déplacement angulaire de l'articulation. Il débute après le tracé de l'EMG des fléchisseurs. On montre alors que dans sa phase initiale le mouvement anisométrique a des caractéristiques proches d'une contraction isométrique.

- θ' est le tracé de la vitesse angulaire du mouvement. La croissance de la vitesse est irrégulière. Elle est rapide jusqu'au moment où le mouvement atteint son accélération maximale, puis plus lente jusqu'à un palier de vitesse situé avant la fin du mouvement. Ce tracé permet de définir l'instant où le mouvement atteint sa vitesse maximale (d).

- θ'' est le tracé de l'accélération. Il permet de repérer le début du mouvement (b), décalé par rapport à l'EMG (a). La force du fléchisseur équivalent est calculée à partir des valeurs de l'accélération. Compte tenu de la géométrie musculo-squelettique, le calcul fait apparaître un déphasage entre les signaux de force et d'accélération. La force maximale peut être atteinte avant le sommet de l'accélération, le décalage est d'autant plus important que l'inertie opposée au déplacement est élevée.

La partie du mouvement que nous étudions, pendant la phase de décroissance de la force est comprise entre les repères c et d.

b) Les électromyogrammes

L'activité électrique des fléchisseurs (BB, BR), n'est pas d'emblée maximale. Le biceps entre en activité avant le brachio-radialis. On étudie le mouvement à partir du moment où l'amplitude des EMG est maximale et constante.

L'activité du triceps est très faible, mais elle indique cependant un léger état de contraction pendant toute la durée du mouvement.

c) *Critères de validité du mouvement*

Parmi les trois mouvements effectués contre chaque inertie, est retenu celui dont :

- Les EMGi des fléchisseurs sont les plus importants
- Les EMGi sont constants pendant la période qui correspond aux mesures
- Le triceps montre peu d'activité antagoniste
- Le tracé de l'accélération est régulier et présente, durant le mouvement, la plus grande valeur de crête.

A partir de ces enregistrements, on calcule les différentes variables cinématiques et mécaniques musculaires du mouvement (voir figure -14-).

2- Résultats

La figure -34- représente les valeurs de force et de vitesse calculées pour un sujet. Ces points se regroupent suivant une relation curvilinéaire que nous avons ajustée à l'équation caractéristique de HILL (1938).

$$(F + a) (V + b) = (F_0 + a) b$$

Les paramètres de l'hyperbole (a, b, c) ont été calculés pour chaque sujet, par une méthode d'ajustement par les moindres carrés, sans pondération.

L'équation de l'hyperbole, ainsi obtenue, s'adapte bien aux points qui correspondent aux valeurs faibles et moyennes de la vitesse. L'intersection de cette fonction avec l'axe des abscisses ($F = 0$) détermine la vitesse maximale (V_0) de raccourcissement. Les valeurs de V_0 ($1,64 \text{ m} \times \text{sec}^{-1} \pm 0,55$) que nous obtenons dans l'ensemble sont sensiblement supérieures à celles de la littérature. $1,27 \text{ m} \times \text{sec}^{-1}$, par exemple pour PERTUZON (1972). Quant à celles de F_0 , calculées par extrapolation de la relation sur l'axe des ordonnées ($V = 0$), elles sont inférieures à celles calculées à partir des efforts isométriques. Les valeurs maximales de force et de vitesse rencontrées

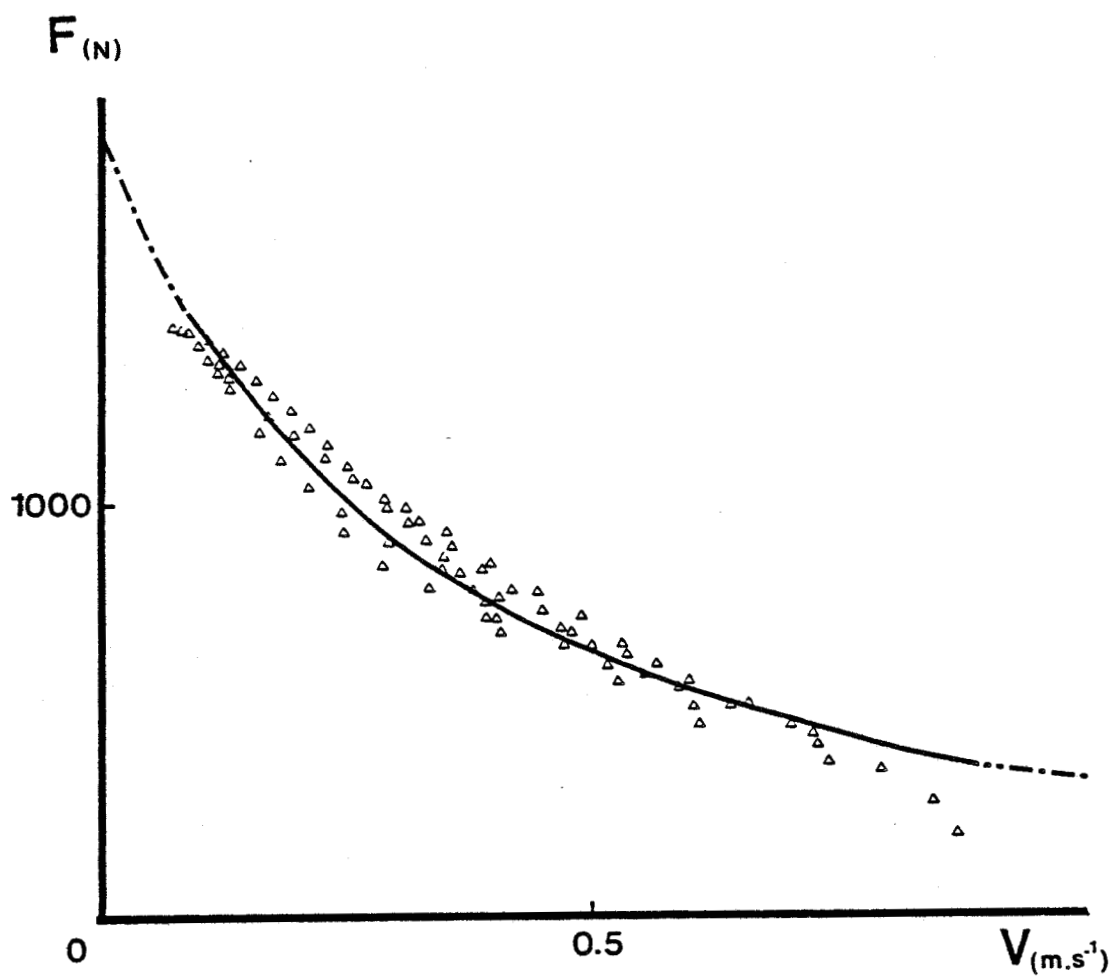


Figure -34- Relation Force - Vitesse

Sujet B.F. après entraînement concentrique

F en Newton

V en mètre par seconde

en continu : relation calculée d'après les points
expérimentaux

en discontinu : relation extrapolée

Les symboles représentent les points expérimentaux.

dans le mouvement sont inférieures aux valeurs extrapolées, nous choisissons d'étudier la relation dans les limites de force et de vitesse réellement rencontrées au cours des mouvements.

a) Etude des relations

La figure -35- montre les tracés des relations pour chaque modalité d'entraînement. Afin de comparer les résultats pour l'ensemble des sujets, la vitesse est normalisée par rapport à la longueur du F.E. à 75° et la force par rapport à la force maximale isométrique à 75° calculée lors du premier test.

Les relations sont tracées d'après les points expérimentaux. Il apparaît qu'après entraînement, elles se situent toujours au-dessus de celles avant entraînement, montrant ainsi de façon générale que l'entraînement de musculation permet un gain de force et de vitesse, quelle que soit la modalité d'entraînement.

L'entraînement permet d'étendre les relations, plus particulièrement vers les forces élevées après entraînement isométrique et concentrique et vers les vitesses élevées après entraînement excentrique.

Pour une vitesse donnée, le gain de force est régulier après entraînement isométrique (figure -35 a-) sur toute l'étendue de la relation.

L'entraînement concentrique montre la même évolution avec un gain inférieur à celui de l'entraînement isométrique (figure -35 b-)

L'entraînement excentrique fait progresser la force davantage pour les vitesses élevées du mouvement (figure -35 c) .

b) Vitesse de raccourcissement pour un pourcentage de F MAX.

La totalité de la relation n'est pas réellement décrite. En effet, au cours des mouvements de flexion, nous mesurons une force de

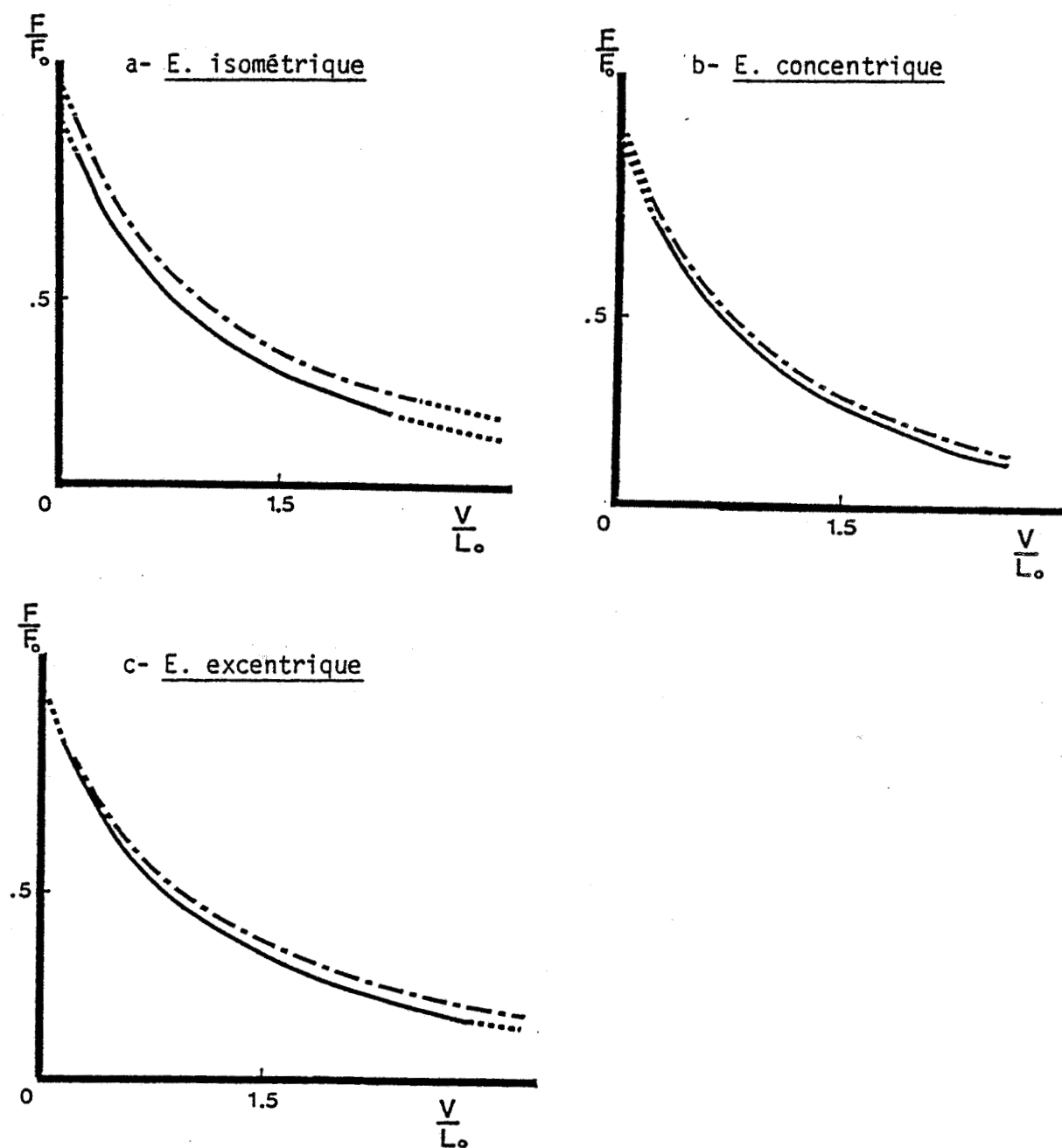


Figure -35- Relations Force - Vitesse avant et après entraînement

La force est normalisée par rapport à F_0 (force ISO à 75° avant entraînement)

La vitesse est normalisée par rapport à l_0 (longueur du F.E. à 75°)

en trait continu : avant entraînement

en tirets-points : après entraînement

en pointillés : relations extrapolées.

de contraction maximale (F MAX) et une vitesse de contraction maximale (V MAX) qui sont inférieures aux valeurs de F_0 et V_0 calculées à partir de la relation typique. C'est pourquoi, nous examinons les vitesses de raccourcissement pour cette valeur particulière de F MAX et pour les valeurs égales à 80%, 60%, 50%, 40% et 20% de F MAX.

Les résultats sont reportés sur la figure -36-. La force a été normalisée par rapport à F MAX mesurée le jour du test et la vitesse par rapport à la longueur du F.E. à 75°. Les résultats sont présentés sous forme de valeurs discrètes.

Après entraînement isométrique, le gain est positif si la force est inférieure à 40 F/F MAX. Il n'y a pas de gain de vitesse pour des forces supérieures à 50 F/F MAX.

L'entraînement concentrique procure des gains, positifs si la force est inférieure à 40 F/F MAX et négatifs si la force est supérieure à 60 F/F MAX. Les gains sont nuls de 40 à 60 F/F MAX.

L'entraînement excentrique donne des gains positifs pour toutes les valeurs de F/F MAX. Le gain est d'autant plus important que les forces sont faibles.

En résumé, si l'on considère les niveaux élevés de la force (F supérieure à 50 F/F MAX), seul l'entraînement excentrique induit un gain de vitesse. Si on considère les niveaux de force inférieurs à 50 F/F MAX, le gain de vitesse est toujours présent. Il est plus marqué pour l'entraînement excentrique.

c) Rapport $\frac{a}{F_0}$

Le rapport $\frac{a}{F_0}$ détermine le degré de concavité de la relation F-V, ce dernier est d'autant plus marqué que $\frac{a}{F_0}$ est faible.

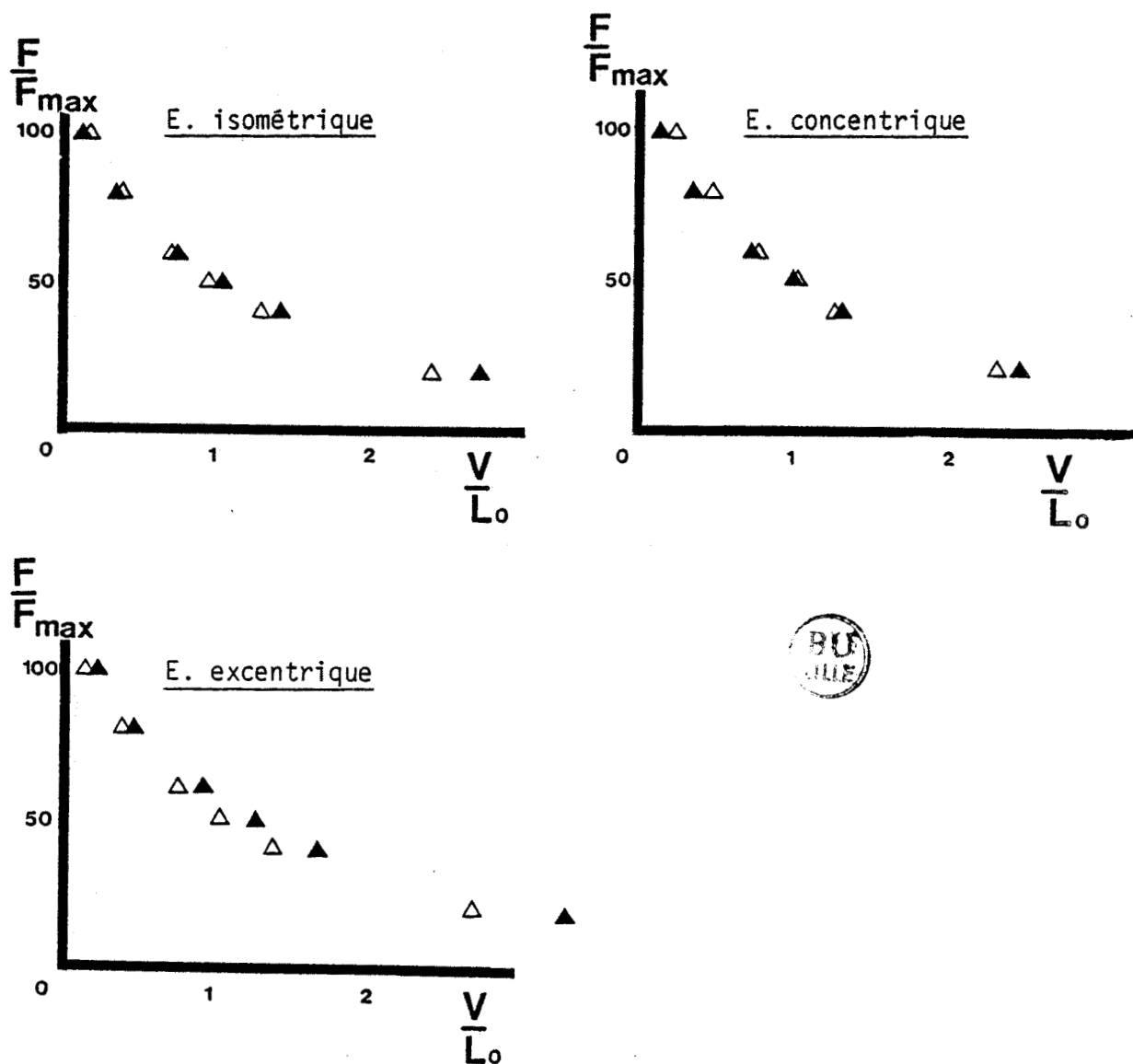


Figure -36- Relation $\frac{F}{F_{max}} = V$ de raccourcissement

V en valeurs normalisées par rapport à la longueur du F.E. à 75°

F par rapport à F maximale mesurée le jour du test.
F/Fmax en pour cent.

$\triangle$ avant entraînement

$\blacktriangle$ après entraînement.

Les valeurs calculées (tableau n° XX) montrent que ce rapport diminue après entraînement. La diminution de $\frac{a}{F_0}$ est plus importante après les entraînements isométrique et excentrique qu'après l'entraînement concentrique.

	TYPES D'ENTRAINEMENT		
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
TEST 1	0,219 $\pm$ 0,05	0,227 $\pm$ 0,043	0,2017 $\pm$ 0,145
TEST 2	0,16 $\pm$ 0,048	0,209 $\pm$ 0,0094	0,152 $\pm$ 0,124
DIFFERENCE en p. cent	26	7,9	24

TABLEAU n° XX : VALEURS DES RAPPORTS $\frac{a}{F_0}$ POUR L'ENSEMBLE DES SUJETS, AVANT ET APRES ENTRAINEMENT.

B - RELATION PUISSANCE - FORCE (P-F.)

La puissance est calculée au moyen de l'expression :

$$P_{(w)} = F \text{ (N)} \times V \text{ (m} \times \text{sec}^{-1}\text{)}$$

A partir de l'équation de HILL (1938), on peut exprimer la puissance directement par rapport à la force ou à la vitesse de l'équation $(F + a) (V + b) = c$

$$\text{On tire } F = \frac{c}{V + b} - a \text{ et } V = \frac{c}{F + a} - b$$

$$\text{d'où } P = F \left(\frac{c}{F + a} - b \right) = V \left(\frac{c}{V + b} - a \right)$$

Connaissant les valeurs des paramètres a, b et c, on peut calculer la puissance pour toute valeur de F ou de V.

1- Description des relations

Les relations sont présentées sur la figure -37-. On a représenté les relations P - F calculées d'après les résultats de la relation F-V. (figure -35-) et ceci pendant les phases du mouvement antérieurement retenues pour le calcul des relations F-V., c'est-à-dire pour les valeurs non extrapolées.

Les relations se présentent sous la forme d'une courbe à maximum. La puissance est nulle pour les valeurs de force du début du mouvement ($\frac{F}{F_0} \approx 1$). Elle augmente au fur et à mesure que la force développée diminue pour atteindre sa valeur maximale pour une force d'environ 30 à 35% de F MAX. La puissance décroît ensuite rapidement.

2- Résultats

Il y a une augmentation de la puissance, après la période d'entraînement pour toute valeur de la force (figure -37-), quelle que soit la modalité d'entraînement.

Tous modes d'entraînement confondus, les valeurs maximales de la puissance instantanée après entraînement ($299,5 \text{ W} \pm 74,5$) sont significativement ($P < 0,02$) plus élevées qu'avant ($259,9 \text{ W} \pm 59,32$).

La puissance est le produit de deux grandeurs, une force et une vitesse. La figure -37- montre que pour obtenir la puissance maximale (P MAX), il y a des conditions optimales de force à respecter.

Sur la figure -38-, on remarque que P MAX est améliorée quelle que soit la modalité d'entraînement choisie, mais cette P MAX est toujours obtenue avec une force inférieure et une vitesse de raccourcissement supérieure. Il est donc vraisemblable que l'augmentation de puissance soit liée plus à un gain de vitesse qu'à un gain de force.

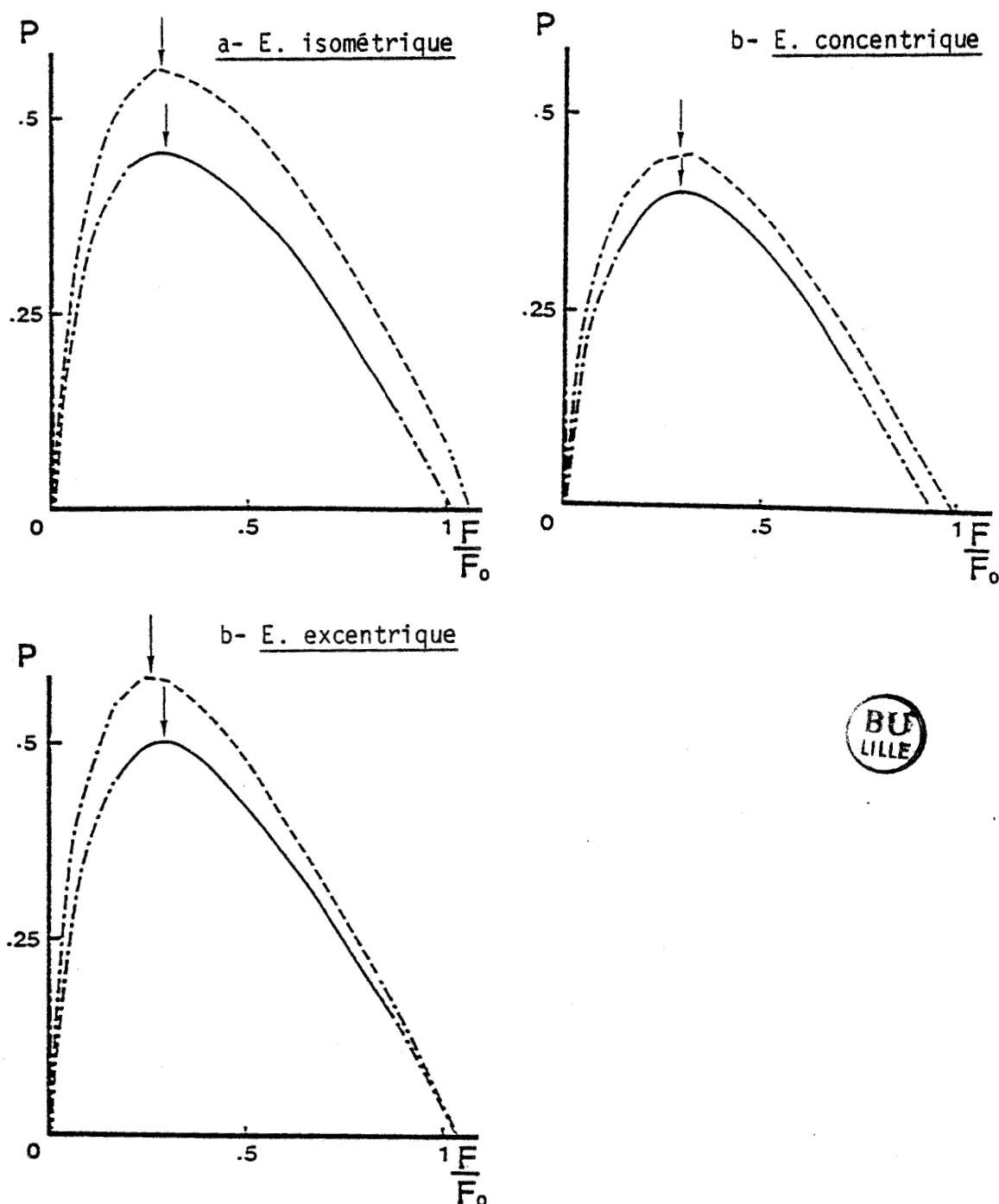


Figure -37- Relations P-F avant et après entraînement.

en ordonnée P normalisée $P = \frac{F}{F_0} \times \frac{V}{V_0}$

F_0 = force maximale du 1er test

l_0 = longueur du FE à 75°

en trait continu : avant entraînement

en trait discontinu : après entraînement

en tirets-points : relations extrapolées

Le mouvement se déroule de $F/F_0 = 1$ à $F/F_0 = 0$

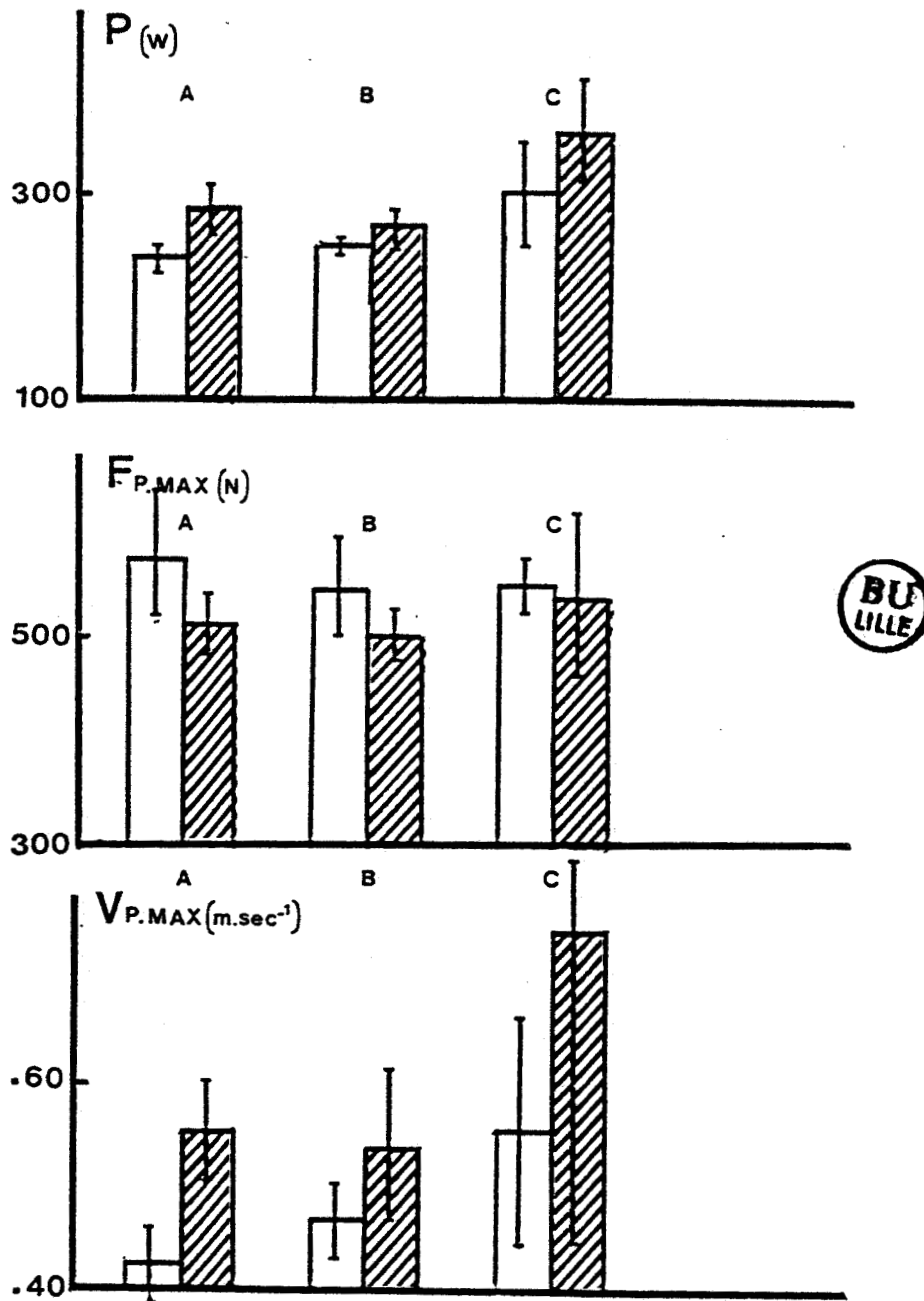


Figure -38- Puissance maximale et les paramètres qui la déterminent

en blanc : avant entraînement

en hachuré : après entraînement

Les écarts type sont figurés sur les histogrammes

A - Ent. isométrique

B - Ent. concentrique

C - Ent. excentrique

P en watts - F de Pmax en Newton, V de Pmax en $m.sec^{-1}$

Pour l'ensemble des groupes la P MAX, après entraînement, est obtenue avec une force inférieure d'environ 8% à celle du 1er test. Par contre, la vitesse de raccourcissement pour P MAX passe en moyenne de $0,48 \text{ m.sec}^{-1} \pm 0,12$ à $0,60 \text{ m.sec}^{-1} \pm 0,21$ ($P < 0,02$) soit un gain de 25%.

C- DISCUSSION

La relation F-V. est établie, à partir d'un ensemble de mouvements réalisés contre des inerties différentes. Nous discuterons successivement des aspects méthodologiques de la détermination des relations F-V. et P-F., puis la signification des résultats obtenus.

1- Aspects méthodologiques

a) *Niveau d'activation*

L'équation proposée par HILL (1938) est faite sur le muscle isolé. Dans ces conditions, l'excitation est d'emblée maximale et constante, par contre l'activation se développe plus lentement. JEWELL et WILKIE (1958) déterminent que l'activation maximale se développe en 60 msec.

Dans le mouvement in situ, le délai pour atteindre un niveau d'activation maximal est long. Il dépend à la fois du temps d'excitation (64 msec sur la figure -22-) et de sa valeur maximale qui détermine l'amplitude de l'EMG. De ce fait, la relation F-V. a été étudiée dans la phase de décroissance de la force, c'est-à-dire quand le niveau d'excitation musculaire est constant et maximal.

b) *Choix de la plage représentative du mouvement*

L'examen de la figure -22- montre que la vitesse angulaire n'est pas croissante pendant toute l'excursion du mouvement, mais qu'elle se stabilise et éventuellement décroît en fin de mouvement ; ceci n'est pas lié à une diminution de l'EMGi des fléchisseurs, ni à une action freinatrice du triceps. N'ont été retenues que les valeurs croissantes de la vitesse et les valeurs décroissantes de la force qui lui correspondent.

c) Pondération des résultats

De façon à explorer l'ensemble de la relation avec le maximum de précision, le mouvement est réalisé contre 5 inerties additionnelles différentes. Seuls les mouvements contre I_0 et I_1 permettent d'explorer la zone des vitesses élevées. Ces mouvements sont très brefs et compte tenu du pas d'échantillonnage, ils ne représentent qu'un nombre peu élevé de points expérimentaux. Les autres inerties explorent la zone des forces élevées. Ces mouvements, d'autant plus longs que les inerties sont élevées, permettent le recueil de nombreux points expérimentaux. Une "pondération expérimentale" est donc réalisée.

Sur l'exemple de la figure -34-, la majorité des points (77%) décrivent la relation $F-V$. pour des vitesses inférieures à $0,50 \text{ msec}^{-1}$ (soit 57% de V_{MAX}).

Il apparaît clairement que les forces réellement développées au cours des mouvements contre les inerties élevées permettent d'exprimer une valeur de la force maximale proche de celle de F_0 . Par contre, les forces développées contre les inerties faibles, qui décrivent la zone des forces faibles et des vitesses élevées, permettent d'exprimer une valeur de V_{MAX} éloignée de celle de V_0 .

C'est pour cette raison que nous nous sommes limités à l'analyse des valeurs de force et de vitesse réellement rencontrées au cours des mouvements et non pas des valeurs extrapolées.

L'analyse des caractéristiques de l'hyperbole a , par conséquent, été limitée à la comparaison du rapport $\frac{a}{F_0}$ avant et après entraînement.

2- Discussion des résultats

a) Rapport $\frac{a}{F_0}$

Pour CLOSE (1972), BINKORST et coll. (1977), le coefficient $\frac{a}{F_0}$

augmente avec la température interne du muscle. L'évolution du coefficient est donc influencée par la nature et le nombre des contractions qui sont réalisées avant les contractions anisométriques volontaires qui permettent d'étudier la relation F-V. L'ordre de succession des opérations au cours des séances tests et le nombre de contractions dans chaque situation ont été identiques lors des deux tests.

Il est donc vraisemblable que l'influence des contractions isométriques qui précèdent les contractions anisométriques, soit identique dans les deux séries-tests. Ceci n'interdit donc pas la comparaison des valeurs de a/F_0 avant et après entraînement.

L'étude des coefficients $\frac{a}{F_0}$ par HILL (1964), CNOCKAERT (1976),

TIHANYI et coll. (1982) met en évidence que les muscles lents possèdent un coefficient $\frac{a}{F_0}$ plus faible que les muscles rapides.

Nos résultats laissent apparaître que l'entraînement de musculation donnerait aux muscles un caractère de muscle plus lent. Cela pourrait peut-être signifier d'une part, que la fatigue est plus rapidement récupérée par les U.M. lentes que par les U.M. rapides, d'autre part, que le test après entraînement est trop rapproché de la fin de la dernière séance d'entraînement. Sans pouvoir vérifier cette hypothèse, nous avons cependant montré auparavant que l'argument de la fatigue ne semblait pas devoir être retenu.

Pour DUCHATEAU (1981), la valeur du rapport $\frac{a}{F_0}$ augmente après

entraînement isométrique et diminue après entraînement concentrique. Mais dans son expérimentation, l'entraînement isométrique est réalisé contre des charges maximales tandis qu'en concentrique, les charges d'entraînement représentent 30 à 40% de la force maximale isométrique. Ceci est différent de notre protocole d'entraînement, durant lequel des charges de 80 à 95% de la charge maximale ont été imposées aux sujets.

Cependant, malgré la différence de protocole, nous pouvons constater que les entraînements de force contre des charges submaximales diminuent la valeur du rapport $a_{\frac{F}{F_0}}$. Ceci a pour effet essentiel d'améliorer la vitesse de raccourcissement surtout pour les faibles niveaux de force, ce qui est vérifié par l'examen des résultats de la figure -38-.

On peut donc dire que les types de contraction musculaire n'auraient pas d'influence sur le sens de la modification du rapport $a_{\frac{F}{F_0}}$, donc de la forme de la relation F-V. Les modifications de la concavité des relations seraient plutôt liées aux valeurs des charges imposées pendant l'entraînement et au gain de force qui en résulte.

b) Relations P x F et F x V

La puissance que développe un muscle permet la réalisation de performances motrices, l'examen de la force et de la vitesse de raccourcissement sont indispensables pour l'étude de la puissance.

α) Relation P x F : cas de la P MAX (figure -38-).

On note que la P MAX est améliorée grâce à une augmentation de la vitesse de raccourcissement. Les résultats, discutés dans le chapitre de la commande motrice, montrent que les exercices excentriques et isométriques entraînent une augmentation de la vitesse de contraction ; nous avons par ailleurs enregistré une diminution de la compliance. Ces constatations sont cohérentes avec l'augmentation de la P MAX. En effet, la vitesse de contraction augmentant, le délai mis pour atteindre un certain niveau de force est plus court ; par ailleurs, la compliance diminuant, l'énergie stockée pendant la phase excentrique de la contraction musculaire est mieux restituée au cours de la phase concentrique de la contraction. On comprend donc que la P MAX soit augmentée de façon plus importante après entraînement excentrique (19,8%), et isométrique (20%), qu'après entraînement concentrique (8%), d'autant plus que les deux premières modalités d'entraînement aboutissent à un gain de force maximale dynamique. Les résultats de BOSCO et coll. (1981), après entraînement excentrique, montrent également que l'augmentation

de la P MAX est associée à une augmentation de la vitesse de contraction.

β) Relation F - V et Puissance

- Entraînement isométrique et excentrique

Nous avons vu que les entraînements isométrique et excentrique, qui améliorent le plus la puissance, sont les seuls à pouvoir assurer un maintien en un gain de la vitesse de raccourcissement pour toutes les valeurs de force. Il apparaît donc que l'augmentation des valeurs de Puissance est liée à l'augmentation de la vitesse de raccourcissement.

- Entraînement concentrique

Les résultats recueillis après l'entraînement concentrique diffèrent des deux autres. Il présente pour des forces élevées (figure -36-) des vitesses de raccourcissement plus faibles après entraînement. L'augmentation des vitesses de raccourcissement n'est décelée qu'en-dessous de 40% de F/F MAX. On peut trouver une explication à ces résultats dans l'analyse du rôle de la CES.

Si l'on considère le modèle de muscle de HILL (1938), la vitesse de raccourcissement dépend de deux composantes placées en série : la CC et la CES. On peut, d'après AUBERT (1956), calculer la vitesse de raccourcissement du muscle (V) d'après l'équation :

$$V = V_{CC} + V_{CES}$$

Dans le cadre de notre protocole, nous ne pouvons pas étudier séparément les deux termes de la vitesse de raccourcissement. Cependant, nous avons constaté que pour un même niveau de force, la compliance série du muscle est augmentée après entraînement concentrique. Il y a donc un stockage plus important d'énergie mécanique potentielle, qui, restituée par la suite, conduit à une amélioration de la performance et probablement à une valeur plus importante des vitesses maximales atteintes.

c) Utilisation en activité physique et sportive

Tous les éléments concernant les modifications des propriétés mécaniques du muscle, nous conduisent à considérer les effets de l'entraînement de musculation sous l'aspect de la pratique sportive.

KOMI et BUSKIRK (1972) montrent que l'entraînement excentrique aboutit à des gains de force supérieurs à ceux de l'entraînement concentrique. HAKKINEN et KOMI (1981) montrent que les modalités d'entraînement mixte (CONCENTRIQUE-EXCENTRIQUE) font progresser la force isométrique et les performances de musculation de façon plus importante que les seuls entraînements concentriques.

Nos résultats expérimentaux permettent de suggérer qu'une combinaison d'exercices isométriques et d'exercices en contraction excentrique pourrait produire des effets positifs dans la réalisation de gestes sportifs pour lesquels les indices de force statique et dynamique doivent être élevés.

Les exercices isométriques à des angles judicieusement choisis, compte tenu des effets spécifiques de l'entraînement sur la performance isométrique, procureraient des gains de force maximaux aux angles pour lesquels les mouvements ou contractions sont proches de l'isométrie. Il s'agit du début d'un effort dynamique concentrique. Dans le cas d'un mouvement de va-et-vient, il s'agit du moment où on observe une inversion du sens de rotation des articulations, c'est-à-dire quand on passe de la contraction concentrique à la contraction excentrique et inversement.

En ce qui concerne l'entraînement excentrique, cette modalité permettrait un gain plus spécifique dans les vitesses de raccourcissement musculaire pendant toute la durée du mouvement et en particulier dans la phase initiale du mouvement.

Cette combinaison d'exercices isométriques et excentriques permettrait d'améliorer la performance du muscle pour toutes les phases du mouvement.

RESUME - CONCLUSION
=====

I - <u>SYNTHESE DES RESULTATS</u>	126
A- SYNTHESE DES RESULTATS DES SEANCES-TESTS	126
1) Entraînement et commande motrice	126
2) Entraînement et propriétés mécaniques	128
a) Contraction isométrique	130
b) Contraction anisométrique	130
c) Contraction anisométrique dans un mouvement déclenché	132
B- RESULTATS DES SEANCES-CONTROLES	132
1) Analyse des résultats	132
2) Discussion des résultats	133
II - <u>CONCLUSION</u>	136

Le but de ce travail est l'étude des modifications des propriétés biomécaniques du muscle après une période d'entraînement, dont le régime de contraction musculaire est, soit isométrique, soit concentrique, soit excentrique, afin de rechercher les spécificités des effets de l'entraînement sur la performance.

L'étude porte sur la commande motrice et sur les relations C-A. et F-L., K-F. et F-V.

Les effets de l'entraînement sur les différentes relations ont été discutés dans les chapitres précédents. Dans cette synthèse, nous résumons les principaux résultats recueillis.

1) Au cours des séances-tests (figure -17-) : ce sont les aspects liés à la commande d'une part, et aux propriétés mécaniques d'autre part, mesurés avant et après la période d'entraînement.

2) Au cours des séances contrôles (figure -17-). L'étude des modifications des charges de travail permettra une approche de la cinétique des effets de l'entraînement pendant le cycle d'entraînement.

Nous tenterons ensuite de proposer une organisation de l'entraînement de la force.

I - SYNTHESE DES RESULTATS

A- SYNTHESE DES RESULTATS DES SEANCES-TESTS.

1- Entraînement et commande motrice

Les résultats sont regroupés dans le tableau n° XXI.

	MODALITES D'ENTRAINEMENT		
	ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
EMGi SOUS MAX	- **	=	+ *
EMGi MAX	=	+ **	+
V _C ISO	- **	-	+ **
V _C ANISO	+	-	+

TABLEAU n° XXI : RESUME DES EFFETS DE L'ENTRAINEMENT SUR LA
COMMANDE MOTRICE

Légende :

- = sans modification
- + tendance à l'augmentation
- tendance à la diminution
- * $P \leq 0,05$) seuils de signification
- ** $P \leq 0,01$)

L'entraînement concentrique a tendance à provoquer une diminution de la vitesse de contraction dans les mouvements isométrique et concentrique, ceci pourrait suggérer un état de fatigue (DUCHATEAU, 1981), peut-être dû à la brièveté de la période séparant la dernière séance d'entraînement de la séance-test. Toutefois les niveaux de l'EMGi en contraction maximale et sous-maximale ne sont pas symptomatiques d'un état de fatigue ; en effet, SCHERRER et MONOD (1960) en contraction sous-maximale montrent une augmentation de l'EMGi et KOMI (1984) une diminution de l'EMGi en contraction maximale.

La diminution de la V_C ne peut pas être expliquée par un état de fatigue, puisque nos résultats montrent une augmentation significative de la vitesse de recrutement après entraînement concentrique, pour une contraction isométrique maximale. Il s'agirait donc plutôt d'un effet de la modification des propriétés biomécaniques du muscle.

L'augmentation du recrutement des U.M. en contraction maximale et sa stabilité en contraction sous-maximale, tendraient à prouver que l'entraînement concentrique augmente le recrutement seulement pour les forces élevées. On peut donc penser que l'entraînement contre des charges supérieures à 80% du maximum solliciterait surtout les grandes U.M. puisque les charges faibles, sollicitant surtout les petites U.M., ne modifient pas le recrutement, selon le "principe size" de HENNEMANN (HENNEMANN et coll. 1965).

L'entraînement excentrique contribue à augmenter l'EMGi pour des couples isométriques maximaux et sous-maximaux. Cette modalité d'entraînement aurait des effets, sur le recrutement qui se manifesterait par une coactivation plus rapide des U.M. Il en résulte une vitesse de contraction plus importante.

L'étude des EMGi après entraînement isométrique, montrant une baisse significative du recrutement en contraction sous-maximale et un maintien du recrutement en contraction maximale, peut laisser penser que les U.M. sont capables de délivrer des tensions supérieures après entraînement. Mais à l'inverse des autres modalités d'entraînement, il n'y aurait pas recrutement d'un plus grand nombre d'U.M. puisque l'EMGi maximal n'est pas modifié.

On peut donc différencier les effets de l'entraînement selon les modalités des contractions utilisées. Il y aurait une amélioration des mécanismes contractiles après entraînement isométrique (MORITANI et DEVRIES 1979). Les entraînements anisométriques auraient un effet sur les modalités de recrutement des U.M.

2- Entraînement et propriétés mécaniques (tableau n° XXII.)

Les résultats présentés sont ceux du couple isométrique, des variables biomécaniques des mouvements anisométriques de flexion et de la compliance.

			MODALITES D'ENTRAINEMENT		
			ISOMETRIQUE	CONCENTRIQUE	EXCENTRIQUE
C. C.	ISOMETRIE	C	+ **	+ **	+ **
		θ de $\Delta F.ISO$	90°	30° et 105° à 120°	120° et 30° à 45°
	ANISOMETRIE	F DYN MAX	+	-	+
		V RAC	=	+	+
		P MAX	+	+	+
C. E. S.	QUICK-RELEASE	K	0,2 F/F_0	-	+
			0,4 F/F_0	-	+
			0,6 F/F_0	+	+
			0,8 F/F_0	+	-

TABLEAU XXII : RESUME DES EFFETS DE L'ENTRAINEMENT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES

Légende :

C : moyenne des résultats du couple isométrique, par angle

θ de $\Delta F.ISO$: angle pour lesquels les gains de force isométrique sont les plus importants

F DYN MAX : force maximale mesurée dans les mouvements anisométriques de flexion

V RAC: vitesse de raccourcissement maximale mesurée dans les mouvements anisométriques de flexion

P MAX: valeur de la puissance maximale mesurée dans les mouvements anisométriques de flexion

K : valeurs de la compliance pour 0,2, 0,4, 0,6 et 0,8 F/F_0

F_0 = force maximale isométrique à 75° du jour du test)

pour les symboles voir tableau n° XXI.

a) Contraction isométrique

Toutes les modalités d'entraînement améliorent la force de contraction isométrique du muscle. L'entraînement isométrique produit un gain moyen plus important que les autres régimes d'entraînement. Il faut noter qu'après les entraînements anisométriques, les gains de force isométrique sont plus importants aux angles qui correspondent au début du mouvement d'entraînement (30° pour l'entraînement concentrique, 120° pour l'entraînement excentrique), c'est-à-dire dans les phases des mouvements d'entraînement où les muscles fonctionnent dans des conditions proches de la contraction isométrique.

On remarque de ce fait que les gains sont particulièrement importants aux angles pour lesquels les contractions isométriques ont été réalisées au cours de l'entraînement, rejoignant en cela les conclusions de ZACIORSKI et RAJCIN (1975) et THEPAUT-MATHIEU (1984).

Nous constatons même que cet effet spécifique de l'angle de travail se manifeste pour les entraînements anisométriques. Dès lors, nous pouvons penser que la combinaison d'exercices isométriques et anisométriques peut être utile pour le développement de la force. L'entraînement isométrique à des angles judicieusement choisis pourrait renforcer les effets de l'entraînement anisométrique dans des mouvements dynamiques pour lesquels il est nécessaire d'acquérir une grande vitesse dans un temps très court.

Cette qualité, en langage sportif, est définie par le terme de force explosive, elle doit être présente dans toute action, au cours de laquelle une inertie importante doit être mobilisée dans un temps très court, ou lorsque cette inertie est soumise à de brusques changements de direction.

b) Contraction anisométrique

Sur le tableau n° XXII on constate que seul l'entraînement excentrique permet un gain de performance pour l'ensemble des variables biomécaniques. La diminution de la compliance pour toutes les valeurs de la

force, contribue à l'amélioration de la performance motrice en assurant une meilleure transmission de l'énergie potentielle élastique stockée pendant la phase initiale de la contraction musculaire. L'efficacité de cette modalité d'entraînement est augmentée par l'amélioration de la force de contraction et de la vitesse de contraction qui permettent de développer des tensions dans un temps plus bref.

De plus, seul l'entraînement excentrique permet (figure -36-c) de réaliser des mouvements dynamiques avec une vitesse supérieure quel que soit le niveau de la force développée. Il semblerait donc que l'on doive privilégier cette forme de travail lorsque les activités réclament les qualités de force explosive-réactive, force explosive-balistique, force explosive-tonique selon les définitions proposées par WERSCHOSHANSKIJ d'après WEINECK (1983) (Tableau n° II).

L'examen des résultats de la P MAX développée au cours de mouvements anisométriques, montre que cette dernière est améliorée par l'entraînement et qu'elle est atteinte pour une vitesse de raccourcissement plus élevée et une force de contraction plus basse.

On peut cependant différencier les effets des entraînements, sur la P MAX par les résultats spécifiques obtenus par chacun d'eux.

Les entraînements excentrique et isométrique procurent le gain de P MAX le plus important, (20%), tandis que l'entraînement concentrique n'améliore la P MAX que de 8%. On constate donc que la P MAX est améliorée de façon importante par les entraînements qui ont amélioré la force maximale dynamique.

Enfin, il apparaît important d'envisager que l'entraînement de la force peut avoir des effets positifs sur la puissance que développe un muscle en agissant soit sur le développement de F MAX (entraînement ISO), soit sur le développement de V MAX (entraînement CONC), soit sur les deux (entraînement EXC).

c) Contraction anisométrique dans un mouvement déclenché (Q.R.)

L'observation des relations compliance-force (figure -29-) montre que ces relations sont surtout modifiées pour les faibles valeurs de la force, c'est-à-dire pour la zone des relations dont les résultats sont les plus critiquables (GOUBEL et PERTUZON, 1973, VIGREUX, 1980). Cependant, il faut remarquer que l'évolution de ces relations est cohérente avec les modifications de la vitesse de contraction anisométrique, en effet, une diminution de la compliance a pour conséquence une augmentation de la vitesse de contraction et inversement. Dès lors, les modifications que nous relevons de la compliance peuvent être interprétées dans le sens d'une modification des propriétés mécaniques du muscle.

L'entraînement concentrique permet de stocker davantage d'énergie potentielle élastique, ce qui viendrait compenser la légère perte de force maximale dynamique. La restitution de l'énergie conduit à une amélioration de la vitesse gestuelle en fin de mouvement.

Les entraînements isométrique et excentrique, auraient pour effet de diminuer la compliance des muscles, donc de mieux assurer la transmission des forces. Il faut cependant observer que l'entraînement isométrique permet un meilleur stockage d'énergie pour des forces supérieures à $0,6 F/F_0$. Les relations des figures -28- et -29-a montrent toutefois que l'augmentation de compliance, pour ces valeurs, est très faible. Seul l'entraînement excentrique modifie la compliance pour toutes les valeurs de la force.

B- RESULTATS DES SEANCES CONTROLES

1- Analyse des résultats

Les progrès des performances d'entraînement sont testés lors de séances-contrôles (S.C.) figure -17- qui se déroulent périodiquement pendant la session d'entraînement. Celles-ci établissent la valeur de la charge maximale que les sujets peuvent supporter dans un exercice. Les contrôles ont été établis lors des séances 1 - 5 - 9 et 13.

On constate (figure -39-) que les résultats sont en progression pendant toute la période d'entraînement, les gains sont en effet toujours positifs. Cependant, l'évolution des résultats est différente selon les modalités de l'entraînement.

Pour l'entraînement isométrique, le gain est progressif jusqu'à la fin de l'entraînement.

Pour l'entraînement concentrique, le gain est nettement supérieur à celui de l'entraînement isométrique pendant les deux premières semaines d'entraînement, il se rapproche ensuite sensiblement de celui de l'entraînement isométrique.

Pour l'entraînement excentrique, les gains sont surtout importants pendant la première semaine d'entraînement. Le gain est ensuite réduit et il tend à se stabiliser dès la 3ème semaine d'entraînement.

2- Discussion des résultats

L'analyse des résultats obtenus, en cours d'entraînement pendant les séances-contrôles et en dehors de la période d'entraînement pendant les séances-tests montre que leur évolution n'est pas identique. Nous allons nous attacher à expliquer cette différence.

Lors des séances-contrôles, les progrès les plus importants sont obtenus après entraînement concentrique (35%), puis après entraînement isométrique (14%), et enfin, après entraînement excentrique (8,4%).

Les résultats des séances-tests montrent des progrès positifs en force dynamique maximale après entraînement isométrique (9,4%) et après entraînement excentrique (6,47%), tandis qu'après entraînement concentrique, il y a une baisse de performance (5,48%). Les résultats enregistrés lors de la première séance-test indiquent également que le groupe d'entraînement excentrique développe une force maximale dynamique ($1653 \text{ N} \pm 195$) plus élevée que celle des autres groupes d'entraînement (G. ISO $1572 \text{ N} \pm 421$, G. CONC $1497 \text{ N} \pm 331$).

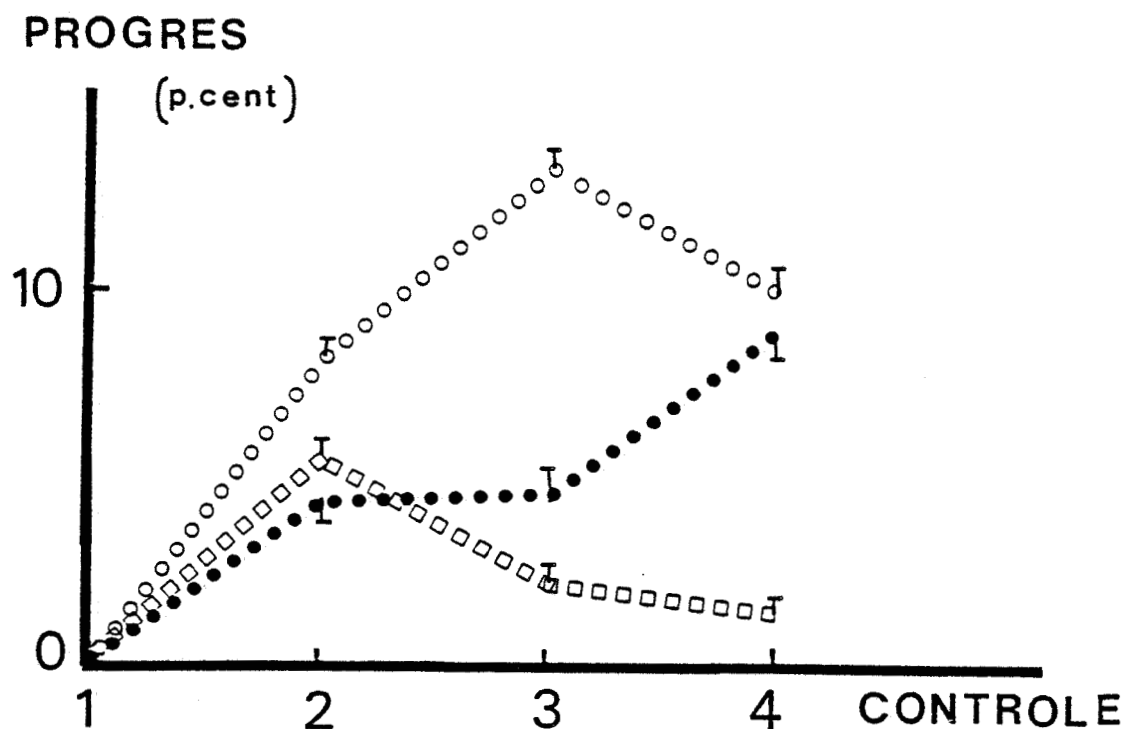


FIGURE -39- : MODIFICATION DES PERFORMANCES PENDANT L'ENTRAÎNEMENT.

Légende :

En abscisse, le numéro des séances contrôles

En ordonnée, les progrès d'un contrôle à l'autre en pour cent

$$\text{Progrès} = \left(\frac{C_n - C_{(n-1)}}{C_{(n-1)}} \times 100 \right).$$

Les cercles pleins : entraînement isométrique

Les cercles évidés : entraînement concentrique

Les carrés évidés : entraînement excentrique

Les écarts-type sont figurés sur les tracés.

Le groupe d'entraînement excentrique étant supérieur aux autres au début de l'entraînement, aurait une marge de progrès limitée par rapport à celle des autres groupes (WEINECK 1983). Les progrès sont alors moins rapides pour ce groupe.

Les progrès obtenus plus rapidement, dans les séances-contrôles, après entraînement concentrique et excentrique permettent de supposer qu'il y a un effet d'apprentissage du mouvement d'entraînement qui est plus important pour les mouvements anisométriques que pour les mouvements isométriques. Ces observations laissent penser que l'amélioration des performances est obtenue par une meilleure coordination intermusculaire (BERNSTEIN 1975, BEULKE 1980) et intramusculaire (BUHRLE et SCHMIDTBLEICHER 1981).

Les entraînements anisométriques permettraient un gain rapide grâce à une meilleure coordination des actions musculaires nécessaires à la réalisation des mouvements. Le fait que les mouvements d'entraînement étaient réalisés dans un plan vertical contre des charges à soulever, tandis que les mouvements des séances-tests étaient réalisés dans un plan horizontal contre des inerties, permet alors de comprendre que l'on puisse progresser dans les séances-contrôles sans progresser dans les séances-tests.

Il se dégage également de nos résultats que le développement de la force musculaire interviendrait plus rapidement après entraînement isométrique qu'après entraînement anisométrique.

Il faut donc connaître, avant de programmer le développement de la force, le niveau de force requis pour la réalisation d'une performance technique.

Si le niveau de force du sportif est jugé trop faible, il semble avantageux d'utiliser en priorité les méthodes de musculation en régime de contraction isométrique afin d'acquérir rapidement le

niveau de force nécessaire à la réalisation de la technique. A ce programme de musculation, on fera suivre un programme de renforcement musculaire qui utilisera un régime de contraction musculaire plus approprié à la spécificité du geste. Il semble en effet important d'envisager le développement de la force, non seulement dans des régimes de contraction musculaire spécifique, mais encore dans un mouvement qui sera proche de celui du geste sportif (HORVATH 1984).

Si le niveau de force est jugé suffisant à la réalisation d'une performance, l'on pourra utiliser dès la phase initiale de l'entraînement des techniques de musculation spécifiques à l'activité sportive.

II - CONCLUSIONS

Nous avons étudié les effets de l'entraînement de musculation contre des charges élevées (supérieures à 80% de la charge maximale) en utilisant des modalités particulières de la contraction musculaire (isométrique, concentrique, excentrique).

Il a été montré que l'entraînement provoquait des modifications spécifiques en fonction des modalités choisies pour la contraction musculaire. Ces modifications, sur les plans nerveux et mécaniques nous permettent de suggérer qu'il faut organiser le programme de développement de la force de façon différente selon le niveau de départ des sportifs et selon les modalités de la contraction musculaire qu'exige le geste sportif.

Cependant, notre étude demande à être complétée par celle des effets à court terme d'une séance d'entraînement et par celle des effets à long terme d'une période d'entraînement.

- Effets à court terme :

Cette étude permettra de vérifier la cinétique précise des effets de l'entraînement sur les propriétés mécaniques du muscle. On

pourra alors mieux organiser la succession des séances dans la période d'entraînement, en maîtrisant mieux la durée qui doit séparer deux séances d'entraînement, ainsi que le nombre de séances d'entraînement nécessaire à la manifestation d'un progrès. HETTINGER (1966) montre que les effets d'une séance isométrique sont surtout importants le jour même et le lendemain. Les gains sont respectivement de 56% pour le jour et 39% le lendemain. Il est en effet important de pouvoir étudier les effets cumulatifs de l'entraînement (WERCHOSKANSKIJ 1979) qui permettent d'obtenir des effets à plus ou moins long terme en s'appuyant sur le principe de surcompensation (MATVEEV 1976) figure -2-. Ces effets peuvent être différents selon les modalités des contractions musculaires et selon les valeurs des charges proposées à l'entraînement.

- Effets à long terme :

Il est connu (OTTO et coll. 1978) que l'amélioration des qualités physiques demande un travail constant, alors que le maintien du niveau acquis peut s'obtenir à l'aide d'un travail réduit en quantité.

HETTINGER et MULLER (1953) figure -40-, ont montré que les progrès après entraînement isométrique étaient plus importants après entraînement journalier (A) qu'après entraînement hebdomadaire (B). Ils montrent également que la durée de l'entraînement est un facteur important pour la conservation du niveau acquis. En outre, la stabilité du niveau de force est plus longue si l'on fait succéder une période d'entraînement journalier (C).

La connaissance des effets du désentraînement sur les propriétés mécaniques du muscle permettrait de pallier la diminution des qualités physiques qui n'entrent plus dans le programme d'entraînement avec un objectif de développement. On pourra ainsi :

- soit développer des qualités physiques en alternance tout en entretenant le niveau acquis dans les cycles précédents
- soit connaître la durée de l'interruption du travail de musculation sans que le niveau acquis ne diminue.

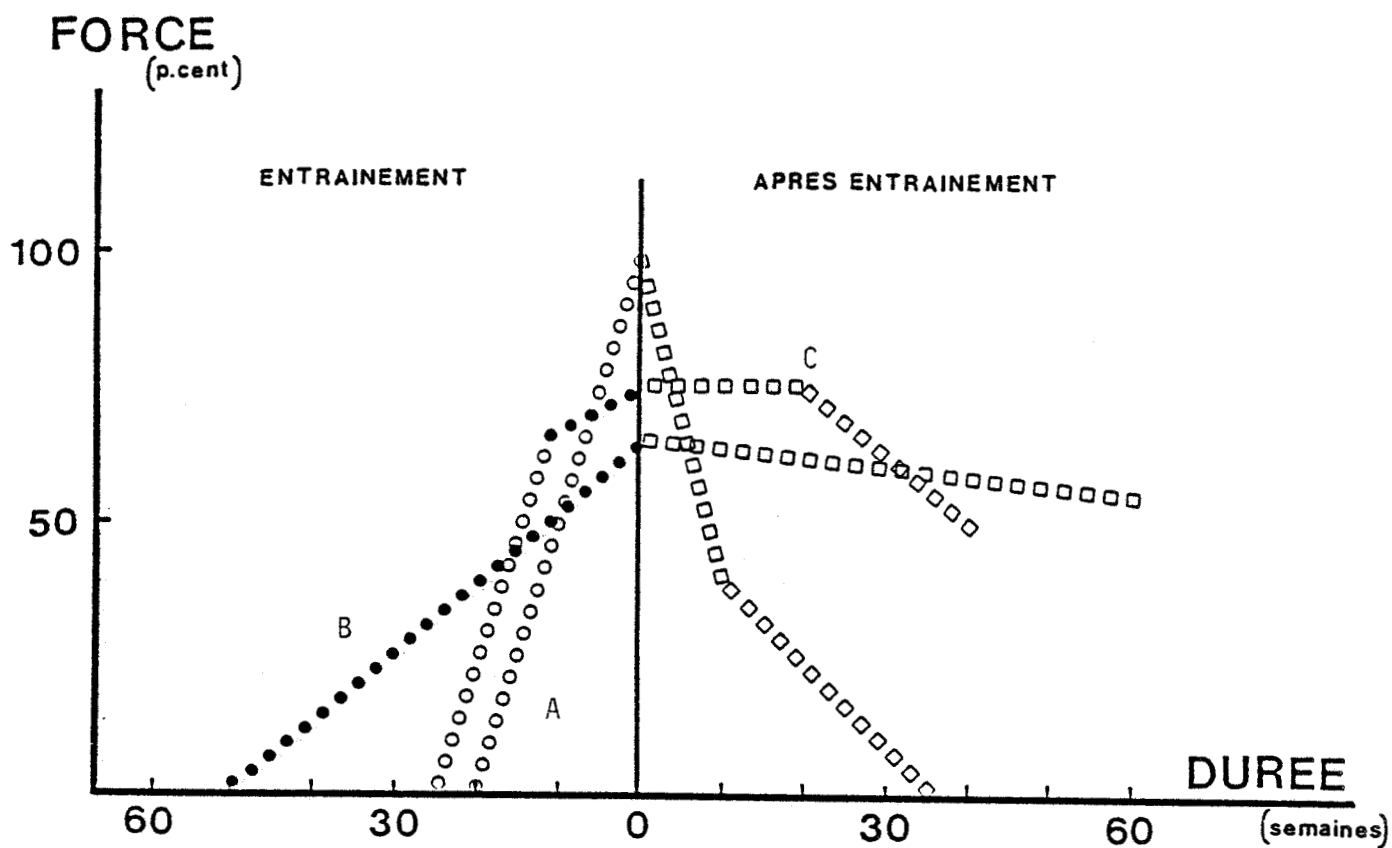


FIGURE -40- : EFFETS DE L'ENTRAINEMENT ET DU DESENTRAINEMENT DE LA FORCE d'après HETTINGER et MULLER (1953).

Légende :

- En ordonnées : gain en force en pour cent de la force initiale
- En abscisses : durées en semaines de l'entraînement et du désentraînement
- Les cercles pleins : entraînement hebdomadaire
- Les cercles évidés : entraînement journalier
- Les carrés évidés : diminution du niveau de force après arrêt de l'entraînement.

En définitive, l'étude présentée ici s'est limitée à trois modalités d'entraînement de la force, prise séparément. Cependant la complexité des gestes sportifs fait que l'on n'utilise pas de façon exclusive un régime de contraction musculaire. Il en est de même des techniques de musculation traditionnellement employées dans l'entraînement. Dès lors, peut se poser le problème de l'agencement interne des séances ou des cycles d'entraînement.

Des études ont déjà été menées pour le travail anisométrique (HAKKINEN et KOMI 1981) : il s'avère que les régimes à prédominance excentrique aboutissent à des gains de force plus importants.

Nous pourrions peut-être mener des recherches de méthodes d'entraînement qui combindraient le travail isométrique et le travail concentrique ou le travail isométrique et le travail excentrique.

Un autre aspect intéressant de cette recherche résiderait en l'étude des charges de travail respectives à introduire lors des cycles d'entraînement.

Enfin, une étude plus poussée de la stabilité des acquis de force et de vitesse de raccourcissement en fonction des différentes modalités d'entraînement affinerait les modèles théoriques de programmation de la force.

B I B L I O G R A P H I E

- ADAM K. et WERSCHOSHANSKIJ J.V. (1978)
Modernes Krafttraining im Sport.
Trainirbibliothek. Band 4. Deutscher Sportbund, ed. Bartels et Wernitz,
1 vol., 148 p.
- AKAZAWA K., FUJII K., KASAIT T. (1969)
Analysis of muscular contraction mechanism by visco-elastic model.
Technology reports of the Osaka University, 19, 902, 577-595.
- AMOROS F. (1848)
Nouveau manuel d'éducation physique gymnastique et morale.
Ed. Lib. Encyclop. Roret, Paris, 2 tomes.
- ANDERSON T. et KEARNEY J.T. (1982)
Effects of three resistance training programs on muscular strength and
absolute and relative endurance.
Research Quarterly for Exerc. A. Sport, 53, 1-7.
- ANGEL R.W., EPPLER W. et IANNONE A. (1965)
Silent period produced by unloading of muscle during voluntary contraction.
J. Physiol., London, 180, 864-870.
- ASMUSSEN E. (1953)
Positive and negative muscular work.
Acta Physiol. Scand., 28, 364.
- ASMUSSEN E. et BONDE-PETERSEN F. (1974)
Storage of elastic energy in skeletal muscles in man.
Acta Physiol. Scand., 91, 385-392.
- BAHLER A.S. (1967)
Series elastic component of mammalian skeletal muscle.
Am. J. Physiol., 213, 1560-1564.
- BAHLER A.S. (1968)
Modeling of mammalian skeletal muscle.
IEE Trans. Bio. Med. Eng., 15, 249-257.
- BANKOV S., JORGENSEN K. (1969)
Maximum strength of elbow flexus with pronated and supinated forearm.
Dan. Nat. Assoc. Inf. Paralysis, 29, 3-11.
- BELLIN DU COTEAU (1930)
Traité d'éducation physique.
T.1 (558-572) Paris, G. Doin ed.
in : La réussite sportive - R. Thomas, Ed. PUF 1975 (1).
- BERNSTEIN N. (1975)
Bewegungsphysiologie.
Ed. Barth, Leipzig.
- BEULKE H. (1980)
Kybernetische Gesichtspunkte zur Steuerung und Regelung sportlicher
Bewegungsprozesse.
Leistungssport, 3, 171-189.

- BIGLAND B. et LIPPOLD O.C.J. (1954)
The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles.
J. Physiol. London, 123, 214-224.
- BINKHORST R.A., HOOFD L., VISSERS A.C.A. (1977)
Temperature and force-velocity relationship of human muscles.
J. Appl. Physiol., 42, 471-475.
- BLANGE T., KAREMAKER J.M., KRAMER A.E. (1972)
Elasticity as an expression of cross-bridge activity in rat muscle.
Pflügers Arch., 336, 277-288.
- BOSCO C., KOMI P.V. (1979)
Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching.
Acta Physiol. Scand., 106, 467-472.
- BOSCO C., RUSKO H. (1983)
The effect of prolonged skeletal muscle stretch shortening cycle on recoil of elastic energy and energy expenditure.
Acta Physiol. Scand., 119, 219-224.
- BOSCO C., KOMI P.V., ITO A. (1981)
Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement.
Acta Physiol., Scand., 111, 135-140.
- BOTTOMLEY A.M., KINNIER WILSON A.B., NIGHTINGALE A. (1963)
Muscle substitutes and myo-electrical control.
J. Brit. I.R.E., 439-448.
- BOUISSET S. (1973)
E.M.G. and muscle force in normal motor activities.
in : J.E. DESMEDT "New developments in E.M.G. and clinical neurophysiology" - Karger ed., Basel, vol. 1, 547-583.
- BOUISSET S., DENIMAL J. (1964)
Etude de la relation entre l'activité électromyographique intégrée et l'accélération d'un mouvement de percussion.
Rev. Neurol. Paris, 110, 347-349.
- BUHRLE M., SCHMIDTBLEICHER D. (1981)
Komponenten der Maximal und Schnellkraft.
Sportwissenschaft, 11, 11-27.
- CAIOZZO V.J., PERRINE J., EDGERTON R. (1981)
Training-induced alterations of the in vivo force-velocity relationship of human muscle.
J. Appl. Physiol., 51, 750-754.
- CASELLA C. (1951)
Tensile force in total striated muscle, isolated fibre and sarcolemma.
Acta Physiol. Scand., 21, 380-401.

- CAVAGNA G.A., CITTERIO G. (1974)
Effect of stretching on the elastic characteristics and the contractile component of frog striated muscle.
J. Physiol. London, 239, 1-14.
- CAVAGNA G.A., DUSMAN B., MARGARIA R. (1968)
Positive work done by a previously stretched muscle.
J. Appl. Physiol., 24, 21-32.
- CAVAGNA G.A., KOMAREK L., MAZZOLENI S. (1971)
The mechanics of sprint running.
J. Physiol. London, 217, 709-721.
- CAVAGNA G.A., ZAMBONI A., FARAGGIANA T., MARGARIA R. (1972)
Jumping on the moon: power output at different gravity values.
Aerospace Medicine, 43, 408-414.
- CAVAGNA G.A., CITTERIO G., JACINI P. (1975)
The additional mechanical energy delivered by the contractile component of the previously stretched muscle.
J. Physiol. London, 251, 65-66 P.
- CAVANAGH R.V., KOMI P.V. (1979)
Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric and eccentric contractions.
Eur. J. Appl. Physiol., 42, 159-163.
- CLOSE R. (1972)
Dynamic properties of mammalian skeletal muscles.
Physiol. Rev., 52, 129-197.
- CNOCKAERT J.C. (1968)
Etude de l'organisation d'un mouvement simple de va-et-vient. Application à la recherche d'un mouvement optimal.
D.E.S., Lille, 1 vol., 49 p.
- CNOCKAERT J.C. (1972)
Effet d'un étirement préalable sur le travail effectué par le muscle au cours du mouvement volontaire.
J. Physiol. Paris, 65, 378A.
- CNOCKAERT J.C. (1976)
Recherche des conditions optimales d'exécution de mouvements simples à partir de critères biomécaniques et électromyographiques.
Thèse Doctorat es Sciences, Lille, Univ. Lille I, 1 vol., 281 p.
- CNOCKAERT J.C., GOUBEL F. (1975)
Rôle de l'énergie potentielle élastique dans le travail musculaire.
Eur. J. Appl. Physiol., 34, 131-170.

- CNOCKAERT J.C., PERTUZON E. (1975)
Comparaison des relations F.V. des fléchisseurs et des extenseurs du coude.
J. Physiol. Paris, 71, 329A.
- DAVIES C.T.M., Mc GRATH K. (1982)
Effects of training and chronic tetanic (40 Hz) stimulation on voluntary and electrically evoked contractions of the triceps surae in a human subject.
J. Physiol. London, 1, 49P.
- DE LORME T.L. (1945)
Restauration of muscle power by heavy resistance exercices.
J. Bone Jt. Surg., 27, 645-657.
- DERN R.J., LEVENE J.M., BLAIR M.A. (1947)
Force exerted at different velocities in human arm movements.
Amer. J. Physiol., 151, 415-437.
- DE VRIES H.A. (1968)
"Efficiency of electrical activity" as a physiological measure of the functional state of muscle tissue.
Amer. J. Physiol. Med., 47, 10-22.
- DUCHATEAU J. (1981)
Contribution à l'étude des mécanismes physiologiques des effets de l'entraînement sur la contraction musculaire.
Thèse Doctorat en Education Physique, Univ. Libre Bruxelles, 1 vol., 210p.
- DUCHATEAU J., HAINAUT K. (1981)
Adaptation du muscle humain et de ses unités motrices à l'exercice.
J. Biophys. et Med. Nucl., 5, 249-253.
- ELKINS E.C., LEDEN U.M., WAKIM K.G. (1951)
Objectives recording of the strength of normal muscles.
Arch. Phys. Med., 32, 639-647.
- FENN W.O. (1938)
The mechanics of muscular contraction in man.
J. Appl. Physics, 9, 165-177.
- FENN W.O., MARSH B.S. (1935)
Muscular force at different speeds of shortening.
J. Physiol. London, 85, 277-297.
- FENN W.O., BRODY H., PETRILLI A. (1931)
Muscular force at different speeds of shortening.
J. Physiol. London, 85, 277-297.
- FEUER D. (1967)
Intégrateur convertisseur (analogique numérique). Application à l'évaluation de l'activité électrique cellulaire.
J. Physiol. Paris, 59, 319-321.

- FLEISHMAN E.A. (1964)
The structure and measurement of physical fitness. Washington.
in : La réussite sportive, R. Thomas, ed. PUF 1975
- FUKUNAGA T. (1976)
Die absolute Muskelkraft und das Muskelkrafttraining.
Sportarzt und Sportmedizin, 11, 255-265.
- GARDNER G.W. (1962)
Specificity of strength changes of the exercised and non-exercised
limb following isometric training.
Res. Quat., 34, 98-101.
- GASSER H., HILL A.V. (1924)
The dynamics of muscular contraction.
Proc. Roy. Soc. B., 96, 398-437.
- GERBEAUX M., LYLEIRE J.C., POULAIN Ph., PERTUZON E. (1981)
Comparaison de trois méthodes de mesure du moment d'inertie des segments
corporels.
6eme Congrès Soc. Biomécanique, Univ. Bruxelles, 17-18 Sept., 1 vol., 67-69.
- GOUBEL F. (1974)
Les propriétés mécaniques du muscle au cours du mouvement sous-maximal.
Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Lille I, 1 vol., 217 p.
- GOUBEL F. (1978)
Muscular compliance during isometric contraction.
J. Physiol. Paris, 74, 609-614.
- GOUBEL F., PERTUZON E. (1973)
Evaluation de l'élasticité du muscle in situ par une méthode de quick-
release.
Arch. Int. Physiol. Bioch., 81, 697-707.
- GOUBEL F., VAN HOECKE J. (1982)
Biomécanique et geste sportif. Incidence des propriétés mécaniques du
muscle sur la réalisation de la performance.
Cinésiologie, XXI, 41-51.
- HAKKINEN K., KOMI P.V. (1981)
Effect of different combined concentric and eccentric muscle work regi-
mens on maximal strength development.
J. of Human Movement Studies, 7, 33-44.
- HÄKKINEN K., VIITASALO J.T., KOMI P.V. (1980)
Die Wirkung unterschiedlich kombinierter konzentrischer und exzentrischer
Muskularbeit auf Kraft-Zeit-Merkmale der Beinstreckmuskulatur.
Leistungssport, 10, 374-381.

- HEBERT G. (1941)
La code de la force.
Ed. Vuibert, 4eme ed., 1 vol., 196 p.
- HENNEMANN E., SOMJEN G., CARPENTER D.O. (1965)
Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes.
J. Neurophysiol., 28, 560-580.
- HETTINGER T. (1966)
Isometrisches Muskeltraining.
Thieme, Stuttgart.
- HETTINGER T., MÜLLER E.A. (1953)
Muskelleistung und Muskeltraining.
Arbeits Physiol., 15, 116-126.
- HILL A.V. (1922)
The maximal work and mechanical efficiency of human muscles and their most economical speed.
J. Physiol. London, 56, 19-41.
- HILL A.V. (1938)
The heat of shortening and the dynamic constants of muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 126, 136-195.
- HILL A.V. (1949)
The abrupt transition from rest to activity in muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 136, 399-420.
- HILL A.V. (1950)
The series elastic component of muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 137, 273-280.
- HILL A.V. (1951)
The mechanics of voluntary muscle.
The Lancet, 2, 947-951.
- HILL A.V. (1953)
The mechanics of active muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 141, 104-117.
- HORVATH L. (1984)
L'évolution historique des méthodes de musculation.
in : Le renforcement musculaire, publication INSEP, 7-35.
- HOWALD H. (1982)
Training-induced morphological and functional changes in skeletal muscle.
Int. J. Sports Med., 3, 1-12.

- HUXLEY A.F. (1957)
Muscle structure and theories of contraction.
Prog. Biophys., 7, 395-410.
- HUXLEY A.F., SIMMONS R.M. (1970)
A quick phase in the series elastic component of striated muscle, demonstrated in isolated muscle fibres from the frog.
J. Physiol. London, 208, 52 p.
- INMAN V.T., RALSTON M.J., SAUNDERS C.M., FEINSTEIN B., WRIGHT E.W. (1952)
Relation of human electromyogram to muscular tension.
E.E.G. Clin. Neurophysiol., 4, 187-194.
- JEWELL B.R., WILKIE D.R. (1958)
An analysis of the mechanical components in frog's striated muscle.
J. Physiol. London, 143, 515-540.
- KOMI P.V., BUSKIRK E.R. (1972)
Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle.
Ergonomics, 15, 417-434.
- KURODA E., KLISSOURAS V., MILSUM J.M. (1970)
Electrical and metabolic activities and fatigue in human isometric contraction.
J. Appl. Physiol., 29, 358-367.
- LE BOULCH J. (1960)
Les facteurs de la valeur motrice.
Thèse pour Doctorat Médecine, Fac. Médecine, Pharmacie, Rennes.
- LENSEL G. (1973)
Etude et réalisation d'un myographe.
D.E.A., Univ. Lille I, 1 vol., 36 p.
- LENSEL G., VIGREUX B. (1982)
Elasticité musculaire et mouvement.
in : 1eres Journées d'Automne : Activités physiques, sports, biomécanique-Beg-Rohu.
- LEVYN A., WYMAN J. (1927)
The viscous elastic properties of muscle.
Roy. Soc. Proc. B., 101, 218-243.
- LIND A.R., PETROFSKY J.S. (1979)
Amplitude of the surface electromyogram during fatiguing isometric contractions.
Muscle Nerve, 2, 257-264.
- LINDH M. (1979)
Increase of muscle strength from isometric quadriceps exercises at different knee angles.
Scand. J. Rehab. Med., 11, 33-36.

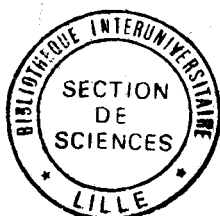
- LIPPOLD O.C.J. (1952)
The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension.
J. Physiol. London, 117, 492-499.
- LUPTON H. (1922)
The relation between the external work produced and the time occupied in a single muscular contraction in man.
J. Physiol. London, 57, 68-75.
- MARECHAL G., CASTEELS R. (1976)
Les muscles lisses de vertébré.
In : C. KAYSER "Physiologie", vol. 2, Flammarion, Paris, 1715-1788.
- MARGARIA R. (1976)
Biomechanics and energetics of muscular exercise.
Clarendon Press ed., Oxford, 1 vol., 146 p.
- MARGARIA R., CAVAGNA G.A., SAIBENE F.P. (1963)
Possibilità di sfruttamento dell' elasticità del muscolo contratto durante l'esercizio muscolare.
Bol. Soc. Ital. Bio. Sper., 39, 1815-1816.
- MASHIMA H., AKAZAWA K., KUSHIMA H., FUJII K. (1972)
The force-load-velocity relation and the viscous like force in the frog skeletal muscle.
Jap. J. Physiol., 22, 103-120.
- MATHIEU C., VAN HOECKE J. (1983)
Spécificité angulaire du renforcement musculaire isométrique.
8eme Congrès Société de Biomécanique, Villeurbanne.
- MATON B. (1970)
Essai d'interprétation de l'E.M.G. de surface en termes d'activités élémentaires du muscle.
Thèse 3eme Cycle, Fac. Sci. Paris, 1 vol., 137 p.
- MATON B. (1975)
Etude périphérique de l'organisation du mouvement volontaire.
Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Lille I, 1 vol., 214 p.
- MATON B., BOUISSET S. (1972)
Motor unit recruitment during movement in normal man. Symposium "Neuro-physiology studied in man".
Fac. Sci. Paris, 20-21 Juillet 1971 - Excerpta Med. Edit., Amsterdam, 1 vol., 312-318.
- MATVEEV L.P. (1976)
Théorie et méthodologie de l'éducation physique.
Edit. F.I.S., Moscou, 2 tomes.
- MATVEEV L.P. (1983)
Aspects fondamentaux de l'entraînement.
Ed. Vigot, 1 vol., 239 p.

- MORITANI T., DEVRIES M.A. (1979)
Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain.
Am. J. Phys. Med., 58, 115-130.
- NORMAN R.W., KOMI P.V. (1979)
Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movements conditions.
Acta Physiol. Scand., 106, 241-248.
- OTTO R.M., FOX E.L., STEVENS C.J. (1978)
Metabolic responses of young women to training and maintenance/detraining.
Med. Sci. Sports, 1, 52.
- PARMLEY W.W., SONNENBLICK E.H. (1967)
Series elasticity of heart muscle : its relation to contractile element velocity and proposed muscle models.
Circulat. Res., 20, 112-123.
- PERTUZON E. (1972)
La contraction musculaire dans le mouvement volontaire maximal.
Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Lille I, 1 vol., 208 p.
- PERTUZON E., BOUISSET S. (1971)
Maximum velocity of movement and maximum velocity of muscle shortening.
Med. and Sports, 6, Biomechanics II, 170-173.
- PERTUZON E., LESTIENNE F. (1973)
Determination dynamique de la position d'équilibre d'une articulation.
Int. Z. Angew. Physiol., 31, 315-325.
- POULAIN Ph. (1981)
Etude du triceps brachial dans des activités de freinage de mouvements réflexe et volontaire chez l'homme.
D.E.A. Biol. et Physiol. Exper. et Appl., Univ. Lille I, 1 vol. 40 p.
- RASCH P.J., MOREHOUSE L.E. (1957)
Effect of static and dynamic exercices on muscular strength and hypertrophy.
J. Appl. Physiol., 11, 29-34.
- SCHERRER J., MONOD H. (1960)
Le travail musculaire local et la fatigue chez l'homme.
J. Physiol. Paris, 52, 419-451.
- SCMIDTBLEICHER D., HARALAMBIE G. (1981)
Changes in contractile properties of muscle after strength training in man.
Eur. J. Appl. Physiol., 46, 221-228.
- TABARY J.C., TABARY C., TARDIEU C., TARDIEU G., GOLDSPIK G. (1972)
Physiological and structural changes in the cat's soleus muscle due to immobilization at different lengths by plaster casts.
J. Physiol. London, 224, 231-244.

- TABARY J.C., TARDIEU C., TARDIEU G., TABARY C., GAGNARD L. (1976)
Functional adaptation of sarcomere number of normal cat muscle.
J. Physiol. Paris, 72, 277-291.
- TARDIEU G., TARDIEU C., MONFRAIX C., GAGNARD L., VELIN J. (1963)
Etude critique de l'électromyographie, comme méthode d'évaluation des infirmités motrices cérébrales. Etude expérimentale de la relation entre la force musculaire et l'électromyographie intégrée.
Rev. Neurol. Paris, 108, 87-96.
- TARDIEU G., TABARY J.C., TARDIEU C., TABARY C., GAGNARD L., LOMBARD M. (1973)
L'ajustement du nombre des sarcomères de la fibre musculaire à la longueur qui lui est imposée.
Rev. Neurol. Paris, 129, 21-42.
- THEPAUT-MATHIEU C. (1984)
Modifications de la force musculaire et de l'activité des motoneurones au cours d'un entraînement isométrique chez l'homme.
Thèse 3eme Cycle, Univ. Paris VI, 1 vol., 87 p.
- THORSTENSSON A., HULTEN B., VON DÖBELN W., KARLSSON J. (1976a)
Effect of strength training on enzyme activities and fibre characteristics in human skeletal muscle.
Acta Physiol. Scand., 96, 392-398.
- THORSTENSSON A., KARLSSON J., VIITASSALO J.H.T., LUTHANEN P., KOMI P.V. (1976b)
Effect of strength training on EMG of human skeletal muscle.
Acta Physiol. Scand., 98, 232-236.
- THYS H. (1973)
Elasticité et contraction musculaires.
Thèse Doctorat, Univ. Liège, n.p.
- THYS H. (1974)
Modifications de l'électromyogramme intégré associées au travail positif des muscles préalablement étirés.
Trav. Soc. Med. B. - ed. Phys. Sports, 23A, 109-113.
- THYS H. (1984)
Elasticité et rendement musculaires.
2eme J. d'Automne, Act. Phys. Sports, Bioméc., 17-18 Novembre, Carcans-Maubuisson.
- THYS H., CAVAGNA T., MARGARIA R. (1975)
The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude.
Pflügers Archi., 354, 281-286.
- THYS H., FARAGGIANA T., MARGARIA R. (1972)
Utilization of muscle elasticity in exercise.
J. Appl. Physiol., 32, 491-494.

- TIHANYI J., APOR P., FEKETE G. (1982)
Force-velocity power characteristics and fiber composition in human knee extensor muscles.
Eur. J. Appl. Physiol., 48, 331-343.
- TRAVILL A.A. (1962)
Electromyographic study of the extensor apparatus of the forearm.
Anat. Rec., 144, 373-376.
- VIGREUX B. (1977)
A propos de la détection de l'activité électromyographique de surface.
D.E.A., Lille, 1 vol., 41 p.
- VIGREUX B. (1980)
L'interaction élasticité-contractilité du muscle humain in situ.
Thèse Doctorat 3eme Cycle, Lille I, 1 vol., 87 p.
- VIGREUX B., CNOCKAERT J.C., PERTUZON E. (1979)
Factors influencing the surface E.M.G.
Eur. J. Appl. Physiol., 41, 119-129.
- VIITASALO J.T., KOMI P.V. (1978)
Force-time characteristics and fiber composition in human leg extensor muscles.
Eur. J. Physiol., 40, 7-15.
- VIITASALO J.T., HIRVONEN J., MERO A. (1982)
Trainingswirkungen des "Schlepptrainings" auf die Laufschnelligkeit, die Maximal und Explosivkraft.
Leistungssport, 3, 185-189.
- VON LANZ T., WASHSMUTH W. (1959)
Praktische Anatomie. Arm Zweite Auflage.
Springer-Verlag, Berlin, 1er tome, 308 p.
- VREDENBREGT J., RAU G. (1973)
Surface electromyography in relation to force, muscle length and endurance.
New developments on electromyography and clinical neurophysiology.
Desmedt J.E. ed., vol. 1, Karger, Basel, 607-622.
- WARD J., FISK G.N. (1964)
The difference in response of the quadriceps and biceps brachii muscle to isometric and isotonic exercise.
Arch. Phys. Med., 45, 614-619.
- WARTENWEILER J., BRUNNER J., WETTSTEIN A. (1971)
L'accroissement de force par l'entraînement musculaire statique et dynamique.
Kinanthropologie, 3/3, 141-145.

- WEINECK J. (1983)
Manuel d'entraînement.
traduit par Urs GAUER, ed. Vigot, 1 vol., 424 p.
- WERCHOSHANSKIJ J.V. (1979)
Quelques principes d'organisation de l'entraînement en athlétisme.
Legkaja Atletika, URSS, 8, 8-10
in Special Sport, INS, 1, 29-35.
- WILKIE D.R. (1950)
The relation between force and velocity in human muscle.
J. Physiol. London, 110, 249-280.
- WILKIE D.R. (1956)
The mechanical properties of muscle.
Brit. Med. Bull., 12, 177-182.
- WILKIE D.R. (1960)
Man as a source of mechanical power.
Ergonomics, 3, 2.
- WONG A.Y.K. (1971)
Mechanics of cardiac muscle, based on Huxley's model : mathematical
simulation of isometric contraction.
J. Biomechanics, 4, 529-540.
- ZACIORSKI V.M. (1966)
Les qualités physiques du sportif (traduction du russe par M. SPIVAK)
Doct. I.N.S., 685, 138 p.
- ZACIORSKI V.M., RAJCIN L.M. (1975)
Le transfert cumulatif de la musculation aux gestes sportifs.
in : Special Sport I.N.S.E.P., 1, 100-106, 1982.



MODIFICATIONS DES PROPRIETES MECANQUES DU MUSCLE HUMAIN APRES ENTRAÎNEMENT DE LA FORCE

Les effets de différents types d'entraînement de la force sur les propriétés contractiles du muscle sont étudiées sur des populations de jeunes adultes. Trois modalités d'entraînement sont comparées : isométrique, anisométrique concentrique et anisométrique excentrique.

La durée des périodes d'entraînement est de quatre semaines, à raison de quatre séances par semaine. On compare, avant et après entraînement, la force maximale statique et la force maximale dynamique du groupe des fléchisseurs du coude, ainsi que la vitesse maximale de raccourcissement.

Les trois modalités d'entraînement augmentent la force isométrique maximale, avec une spécificité marquée de l'entraînement isométrique.

La force maximale dynamique est améliorée par les entraînements isométrique et excentrique mais ne l'est pas par l'entraînement concentrique.

La vitesse maximale de raccourcissement est améliorée par l'entraînement anisométrique excentrique et, à un degré moindre, par l'entraînement concentrique. En outre, c'est l'entraînement excentrique qui apporte le gain de puissance le plus important.

Ces résultats sont discutés du double point de vue des mécanismes de la contraction musculaire et des modalités d'application à la pratique sportive.

MOTS CLEFS

Muscle humain - Entraînement - Force - Vitesse - Puissance.

