

50376
1984
115

50376.
1984.
115.

N° d'ordre : 1157

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

**THESE DE TROISIEME CYCLE
BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES
(Mention Physiologie Nerveuse et Musculaire)**

présentée par

Michel GERBEAUX



**DEVELOPPEMENT MUSCULAIRE ET CROISSANCE
CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT
(Etude biomécanique)**

Soutenue le 1er juin 1984 devant la Commission d'Examen

Jury :	MM.	J.P. ROUSSEAU	Président
		E. PERTUZON	Rapporteur
		B. MATON	Examineur
		J. VANLERENBERGHE	Examineur

Travail réalisé au laboratoire de Physiologie Neuromusculaire

AVANT-PROPOS

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

Aussi, je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur le Professeur E. PERTUZON qui, après m'avoir accueilli dans son laboratoire, m'a beaucoup aidé. Ses conseils compétents et ses critiques judicieuses ne m'ont jamais fait défaut.

Monsieur le Professeur J.P. ROUSSEAU, dont j'ai beaucoup apprécié les enseignements, a bien voulu accepter la présidence de mon jury de thèse. J'en suis très honoré et je l'en remercie beaucoup.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le Professeur J. VANLERENBERGHE qui, depuis de nombreuses années, a su me faire profiter de ses multiples compétences.

Monsieur B. MATTON me fait le grand honneur de bien vouloir examiner ce travail et de siéger dans ce jury. Je l'en remercie très sincèrement.

Cette étude fait appel aux techniques radiographiques et je remercie Monsieur le Professeur P.H. MULLER et le Docteur M. MÉRAUX pour la confiance et l'aide qu'ils m'ont prodiguées en m'offrant les services de l'Institut de Médecine Légale.

Monsieur J. ROUSSEAU, Maître-Assistant au Laboratoire de Biophysique de l'U.E.R. de Médecine de Lille, a su, par sa gentillesse et sa disponibilité, m'apprendre à utiliser l'ordinateur. C'est une performance dont je lui suis reconnaissant.

Je remercie Monsieur le Professeur FRANCK qui, à la Cité

Hospitalière, a accepté, en liaison avec Monsieur le Professeur GUERRIN, de mouler les différents gabarits d'avant-bras dont j'avais besoin.

Je remercie également tous les enseignants du Laboratoire de Physiologie Neuromusculaire pour l'aide spontanée qu'ils ont bien voulu m'apporter.

Merci à mes amis et compagnons de route, J.C. LYLEIRE et P. POULAIN ; remerciements auxquels j'associe volontiers R. DHÉLIN pour son aide discrète mais combien efficace à l'U.E.R. E.P.S.

Madame Y. DODEY a assuré avec beaucoup de goût la mise en page de ce mémoire. Je ne saurais trop la remercier de son amabilité.

Monsieur R. COISNE, l'homme qui rend les métaux malléables, a surveillé avec attention la mise au point et les réglages du dispositif ergométrique.

Le travail photographique a été assuré à l'U.E.R. E.P.S. par l'équipe de l'A.S.V.I., sous la direction de mon ami J. DERETTE.

Mon épouse et mes enfants, Thierry, Nadine et Patrick, ont assuré de nombreuses tâches dites pratiques qui m'ont permis de terminer ce travail.

Enfin, je remercie tous les enfants et adolescents de Lezennes et des environs ; contre quelques sacs de bonbons, ils ont accepté, en confiance, de me prêter leur musculature que je ne qualifierai pas de squelettique.

S O M M A I R E

INTRODUCTION	1
I - TECHNIQUES ET PROTOCOLES	39
II - DÉVELOPPEMENT BIOMÉTRIQUE ET OSSEUX	59
III - RELATIONS COMPLIANCE-FORCE DU FLÉCHISSEUR ÉQUIVALENT	65
IV - RELATIONS COUPLE-ANGLE ET FORCE-LONGUEUR	75
V - RELATIONS FORCE-VITESSE ET PUISSANCE-VITESSE	92
DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSIONS	113
BIBLIOGRAPHIE	122

INTRODUCTION

A - LA CROISSANCE	3
1. OBSERVATIONS DES FAITS	3
2. METHODES D'ETUDE	4
a - Méthode transversale	4
b - Méthode longitudinale	5
3. LOIS DE LA CROISSANCE	5
a - Inégalité de la croissance dans le temps	6
b - Inégalité de la croissance des organes et des segments corporels	6
4. INDICES DE CROISSANCE	8
a - Age dentaire	8
b - Age crânien	8
c - Age pondéral	8
d - Age statural	9
e - Age sexuel	10
f - Age thoracique	10
g - Age osseux	11
h - Age physiologique	11
5. ETAPES DE LA CROISSANCE	13
a - Petite enfance	13
b - Moyenne enfance	13
c - Grande enfance	14
d - Adolescence	14
e - Jeunesse	14
6. FACTEURS DE CROISSANCE	14
a - Facteurs génétiques	15
b - Facteurs d'environnement	15
c - Facteurs sexuels	16
 B - DÉVELOPPEMENT MUSCULAIRE	 18
1. STRUCTURE DU MUSCLE MATURE	18
2. CROISSANCE DU MUSCLE	20
3. CROISSANCE DES FIBRES MUSCULAIRES	20
4. MATURATION DES TYPES DE FIBRES ET DES UNITES MOTRICES	22
a - Fibres musculaires	22
b - Unités motrices	23
5. PROPRIETES MECANIQUES DU MUSCLE ET DU MOUVEMENT	26
a - Contraction isométrique volontaire	27
b - Contraction anisométrique	29

c - <i>Elasticité musculaire</i>	31
d - <i>Propriétés mécaniques du muscle et croissance</i>	33
 C - OBJECTIF DE L'ÉTUDE ET CHOIX DE LA PRÉPARATION	35
1. BUT DE L'ETUDE	35
2. CHOIX DE LA PREPARATION ET DU MOUVEMENT	35
3. CONDITIONS D'INTERPRETATION EN TERME DE MUSCLE	36
a - <i>Position d'équilibre articulaire</i>	36
b - <i>Notion de muscle équivalent</i>	36
c - <i>Muscle et activité électrique</i>	36
4. HYPOTHESES	38

L'Homme doit se mouvoir, effectuer un certain nombre de gestes, de mouvements, des plus simples aux plus complexes, que ces mouvements soient développés dans sa vie de nutrition et dans sa vie de relation.

La masse musculaire représente de l'ordre de 40 % de la masse corporelle chez l'adulte. Il s'agit donc d'une part importante du corps, aussi bien du point de vue anatomique que du point de vue fonctionnel.

Le système musculaire constitue l'effecteur d'un système plus complexe, le système neuromusculaire dont le développement s'effectue au cours de la croissance, parallèlement au développement du squelette et des systèmes circulatoires et respiratoires. La fin de la croissance marque l'état adulte. Les étapes ultérieures sont plutôt caractéristiques du vieillissement.

Au cours de la croissance, se développent progressivement les capacités physiques de l'individu, capacités qui peuvent s'exprimer dans les relations de la vie quotidienne, du sport, de l'éducation physique et, plus tard, du travail.

On conçoit donc toute l'importance de l'étude des caractéristiques mécaniques du système musculo-squelettique. En ce sens, l'étude des propriétés de ce système constitue l'un des volets de la biomécanique.

L'étude biomécanique des mouvements a pu se développer à partir des travaux d'un certain nombre de chercheurs tels que Léonard de VINCI et, plus tard, E.J. MAREY (1860), G. DEMENY (1860), *DUCHENNE DE BOULOGNE* (1867).

L'analyse des mouvements a, par ailleurs, pu s'affirmer progressivement par le développement d'un certain nombre de techniques appliquées

à l'étude de la contraction musculaire. Dès la fin du 19ème siècle, quelques propriétés mécaniques du muscle strié squelettique sont énoncées, telles que l'élasticité et la contractilité.

Au début du 20ème siècle, commence à être proposée une modélisation du muscle et c'est ainsi que *HILL (1938)* propose un modèle de muscle à deux composantes régies par des lois caractéristiques. Ce modèle, enrichi ultérieurement par un grand nombre de travaux (*AUBERT, 1956 ; HUXLEY, 1957 ; JEWELL et WILKIE, 1958 ; BAHLER, 1968 ; CLOSE, 1972*) reste encore de nos jours la base des techniques biomécaniques d'étude du muscle strié squelettique.

Les propriétés mécaniques du muscle chez l'adulte sont relativement bien connues principalement dans le domaine du sport. Par contre, très peu de travaux ont été effectués quant au développement de ces propriétés mécaniques au cours de la croissance de l'enfant et de l'adolescent. Cet aspect particulier du développement est d'un intérêt capital pour tous ceux qui sont concernés par les problèmes du développement des capacités physiques tels que les rééducateurs, les entraîneurs sportifs, les enseignants d'éducation physique et sportive, les kinésithérapeutes etc...

A - CROISSANCE

La croissance est définie comme étant le "développement progressif d'un être vivant ou d'une chose" (Larousse 1982). TOMKIEWICZ (1974) définit la croissance en termes biologiques par rapport aux notions de développement et de maturation.

"Le développement signifie l'ensemble des phénomènes qui permettent à l'enfant d'évoluer depuis la conception jusqu'à l'âge adulte. Il comprend donc à la fois :

- a) *la croissance*, qui traduit les modifications chiffrables de l'organisme ou d'un organe particulier. Ce terme s'applique avant tout à la taille et au poids ;
- b) *la maturation*, phénomène plus difficilement quantifiable, qui s'applique à la différenciation des cellules et des tissus, à leur affinement anatomique et fonctionnel, à la diversification des réactions physiques, chimiques et biologiques, voire même des comportements et des conduites qui dépassent la biologie au sens strict du terme".

Ces définitions du développement, de la croissance et de la maturation, seront utilisées dans l'ensemble de ce travail.

1) OBSERVATION DES FAITS

Les enfants, dans leurs jeux, se réunissent ou sont réunis par groupes d'âge. Il y a toujours des grands et des petits dans chaque groupe. Il y a entre chacun des dissemblances morphologiques plus ou moins grandes.

L'organisation scolaire, basée sur les groupes de classes (C.P., 6ème, 4ème etc...) et l'organisation sportive, basée sur les catégories

d'âges (poussins, minimes etc...) utilisent comme référent organisationnel, l'âge civil. L'âge civil est déterminé à partir de la date de naissance ; il est également qualifié d'"âge chronologique".

L'âge chronologique ne donne que des renseignements approximatifs sur le stade de développement de l'enfant, donc sur son niveau de croissance et de maturation.

D'un point de vue plus strictement scientifique, on a tenté de dégager des critères de développement plus pertinents, plus fidèles et plus fiables.

Cette étude ayant pour objet de classer des individus dans des catégories pour pouvoir analyser l'évolution de leur développement musculaire, nous avons décidé d'utiliser comme critère de classement "la croissance". Nous allons donc en dégager les lois, les caractéristiques et nous choisirons, dans les différentes approches de la croissance, celle qui nous paraît la plus adaptée à notre étude.

2) METHODES D'ETUDE

L'étude de la croissance peut être abordée par la biométrie ; c'est une partie de la biologie. Elle applique aux êtres vivants les connaissances statistiques.

L'étude de la croissance humaine peut se faire par deux méthodes différentes :

a - Méthode transversale

Elle consiste à former des groupes d'enfants d'âges chronologiques différents, 10 ans, 11 ans etc... et à les comparer entre eux de façon à dégager les caractéristiques de chacun de ces âges. Cette méthode est rapide mais présente le défaut méthodologique d'admettre à priori que les enfants de 10 ans acquièrent, d'ici à un an, les caractéristiques du

groupe de 11 ans. Cette méthode, appelée "étude statique" par *TOMKIEWICZ* (1974) permet d'établir des "tables". Ces tables aideront à déterminer les critères de normalité des groupes envisagés.

b - Méthode longitudinale

Elle consiste à suivre les mêmes enfants tout au long de leur croissance en notant régulièrement les différences survenues dans les caractéristiques que l'on étudie. Elle est plus précise mais plus longue et plus difficile à réaliser.

La première étude de ce type fut réalisée par *GUENEAU de MONTBEILLARD* (1759). *BUFFON* fit paraître les résultats de ce travail dans son "histoire naturelle universelle".

Cette méthode, appelée "étude dynamique" par *TOMKIEWICZ* (1974) met en relief la notion de "vitesse de croissance" et permet d'émettre des prévisions sur les dimensions que pourra atteindre un sujet.

3) LOIS DE LA CROISSANCE

Dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, *BOAS* (1888) reprend et systématise les études dynamiques sur la croissance. *DUFESTEL* (1920/1930) étudie le développement physique et la croissance. *GODIN* (1935) étudie la croissance du système osseux et de la stature. *LINDEGARD* (1953) tente de préciser les variations et les incertitudes des mécanismes de croissance.

SCHREIDER (1956), ayant pour objectif les problèmes d'orientation professionnelle et scolaire, tente de mettre en rapport la morphologie et la physiologie avec, comme outil d'analyse, la biométrie humaine. *TANNER et al* (1962) produit un document exceptionnel (1 200 références) qui résume, à cette époque, les connaissances concernant la croissance, non seulement chez l'adolescent mais pendant toute la durée du développement post-natal. Ce document précise la notion d'âge physiologique. Les travaux de *TOMKIEWICZ* (1974) et *VANDERVAEL* (1980) permettent de dégager les

caractéristiques de la croissance.

La caractéristique essentielle des phénomènes de croissance est leur discontinuité. Cette discontinuité affecte l'ensemble du corps et ses différentes parties. On perçoit des phases alternées de brusques poussées et de repos. Le rythme même de ces alternances est fort variable.

a - Inégalité de la croissance dans le temps

De cette loi se dégage la notion de "périodes de croissance".

Après la naissance et jusqu'à la fin de la croissance, l'augmentation de la taille est un phénomène permanent, ininterrompu mais sa vitesse est irrégulière. La *figure 1* permet de repérer des périodes de croissance.



Fig. 1 - Courbe de "vitesse de croissance"

(En ordonnées : accroissement annuel de la taille en centimètres)

(TOMKIEWICZ, 1974)

b - Inégalité de la croissance des organes et des segments corporels

L'enfant qui grandit n'augmente pas seulement sa taille et son poids. Il se produit une maturation morphologique qui fait que son allure

générale et les proportions de son corps changent en même temps (*Fig. 2*). Ce changement de proportions est dû à la croissance différentielle des organes et des segments du corps dont chacun possède sa vitesse de croissance particulière et indépendante.

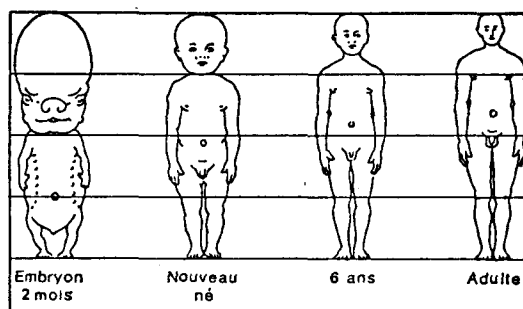


Fig. 2 - Maturation morphologique du corps

d'après ROBBINS (1928)

L'évolution harmonieuse de ces croissances partielles va conditionner la maturation morphologique normale. La *figure 3* nous montre cette

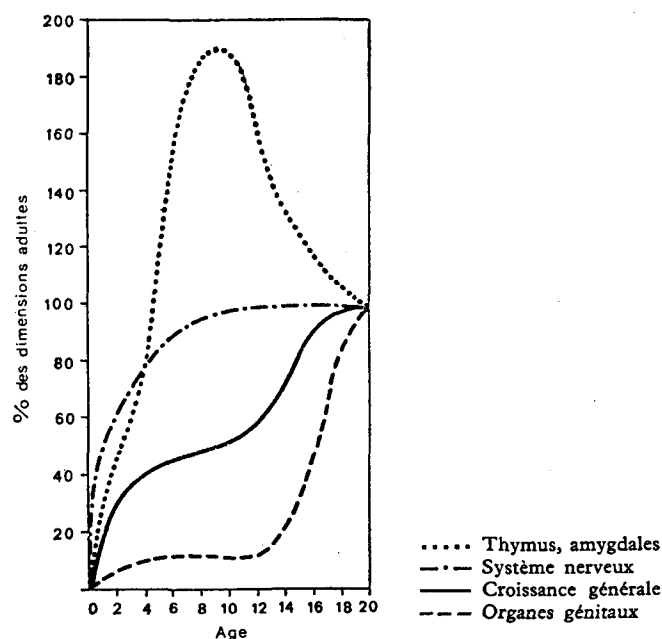


Fig. 3 - Croissance relative des organes

d'après HARRIS (1930)

maturation à travers quatre éléments de croissance particuliers : le thymus, le système nerveux, la croissance générale ou staturale et les organes génitaux.

En conclusion, la croissance est un phénomène par lequel passent tous les êtres vivants normaux, avant de devenir adultes. La croissance est discontinue dans le rythme des phases appliquées aux différents organes du corps.

4) PRINCIPAUX INDICES DE CROISSANCE

De nombreuses études ont permis de dégager différents critères permettant de connaître l'âge approximatif d'un enfant par la biométrie.

a - Age dentaire

La présence ou l'absence de certaines dents permet de déterminer l'âge d'un enfant. C'est un mauvais indice de maturation car la dispersion des valeurs normales est grande. L'éruption dentaire dépend de nombreux facteurs particuliers comme l'état de santé ou l'alimentation. L'examen radiologique des germes permet éventuellement d'ajuster cet indice d'âge.

La lecture de l'âge dentaire ne peut se faire qu'entre 0 et 14 ans environ.

b - Age crânien

Il est déterminé à partir du périmètre crânien. Cette croissance est très rapide la première année (36 à 47 cm). Elle se ralentit beaucoup ensuite et devient très difficilement utilisable pour déterminer l'âge d'un enfant au-delà de 3 ans.

c - Age pondéral

Il est défini par la mesure de la masse corporelle. Il subit la même évolution que l'âge statural, avec un certain retard. Après une

phase d'allongement osseux, survient une phase d'élargissement des os qui s'accompagne d'une augmentation de poids par allongement et épaississement du système musculaire en particulier.

d - Age statural

Il est défini par la mesure de la taille debout (*Fig. 4*). La taille augmente d'autant plus rapidement que l'individu est plus jeune, avec l'existence de crises de croissance, c'est-à-dire d'accéléérations et de ralentissements du processus d'allongement du système osseux.

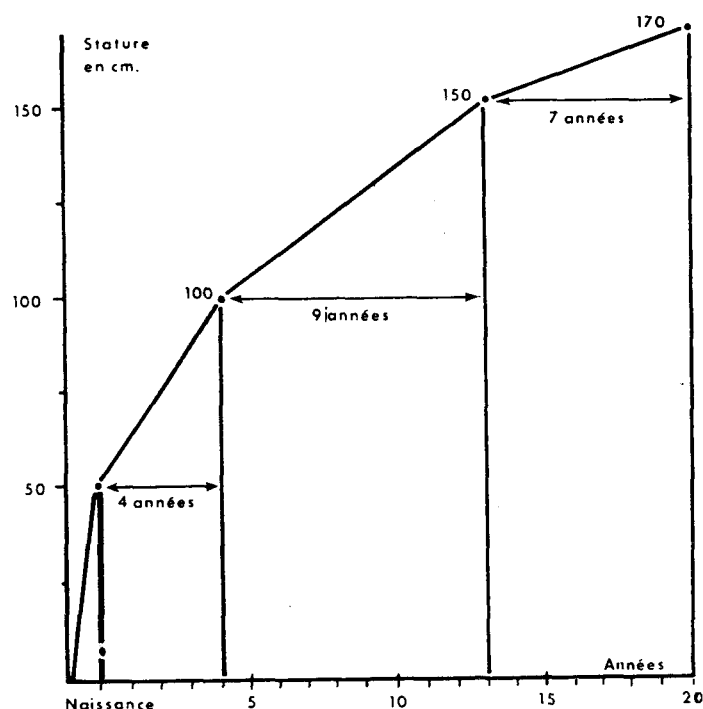


Fig. 4 - Rythme de l'allongement de la stature
(*Fig. de GODIN (1935), modifiée pour les âges par OLIVIER (1961)*)

L'âge statural et l'âge pondéral sont utilisés conjointement dans la détermination de l'âge d'un enfant.

e - Age sexuel

Les premières différenciations sexuelles morphologiques se manifestent entre 8 et 11-12 ans par la forme du bassin, du crâne et le développement du tissu graisseux sous-cutané. C'est entre 11 et 18 ans que se produit la maturation des glandes génitales avec apparition des caractères sexuels secondaires.

f - Age thoracique

Il est déterminé à partir du périmètre du thorax. La figure 5

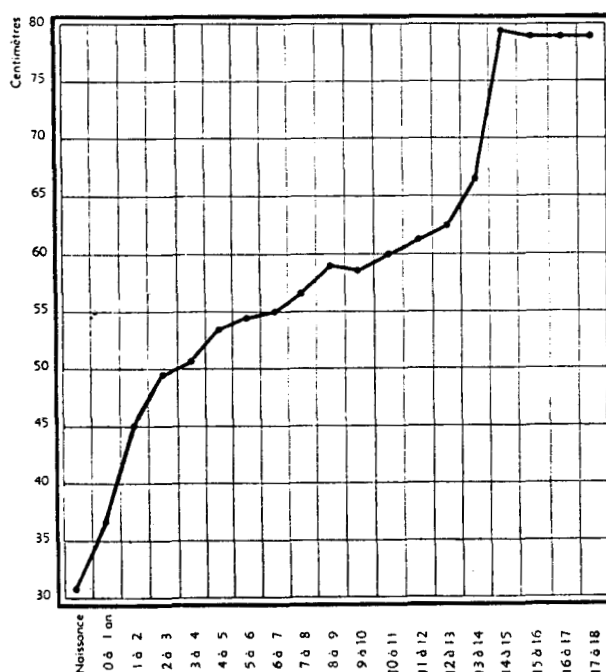


Fig. 5 - Accroissement du périmètre thoracique

(DUFESTEL, 1920)

montre deux augmentations importantes, l'une à la naissance, l'autre pendant la puberté. Dans le même temps, la musculature augmente rapidement et la force musculaire est plus importante.

g) Age osseux

La découverte des rayons X par *ROENTGEN* (1895) va permettre de constater sur l'être vivant le phénomène de maturation osseuse. Cette maturation se manifeste selon *SPEYER* (1950), *FALKNER* (1958), *MARSHALL* (1966), *ACHESON* (1966), par des modifications de forme et de dimension du squelette qui, à l'origine, est constitué par du tissu cartilagineux se minéralisant graduellement pendant toute la croissance et devenant du tissu osseux. La maturation osseuse, contrairement aux autres indices, se déroule régulièrement dans un ordre presque immuable. De nombreux auteurs, parmi lesquels *MATER* (1947), *GREULICH et PYLE* (1959), *SAUVEGRAIN et al* (1962), *SEMPE* (1979), vont participer à l'élaboration d'ouvrages et d'atlas utilisables pour définir l'âge osseux d'un enfant.

Le choix du poignet de la main gauche, convention admise par *TODD* (1937) et les anthropologues, est désormais seul utilisé comme critère.

D'après *BAYLEY* (1943), *HAMMAM* (1961), *JOHNSTON* (1964), *TANNER* (1964), *ANDERSEN* (1968), il existe une bonne corrélation entre le développement osseux et l'apparition des caractères sexuels secondaires, de même entre le développement osseux et la croissance staturo-pondérale. La corrélation entre l'âge osseux et l'âge dentaire est, selon *HUNT* (1955), moins fiable (*Fig. 6*).

h) Age physiologique

Les enfants passent par les mêmes phases évolutives mais pas aux mêmes âges. Il est intéressant de faire à un moment donné, le diagnostic de l'étape à laquelle ils sont arrivés, c'est-à-dire de définir leur "âge physiologique" par rapport à leur "âge chronologique". *TANNER et al* (1962) propose d'utiliser quatre critères pour définir cet âge physiologique :

- . le degré d'ossification du squelette
- . l'âge d'éruption des dents

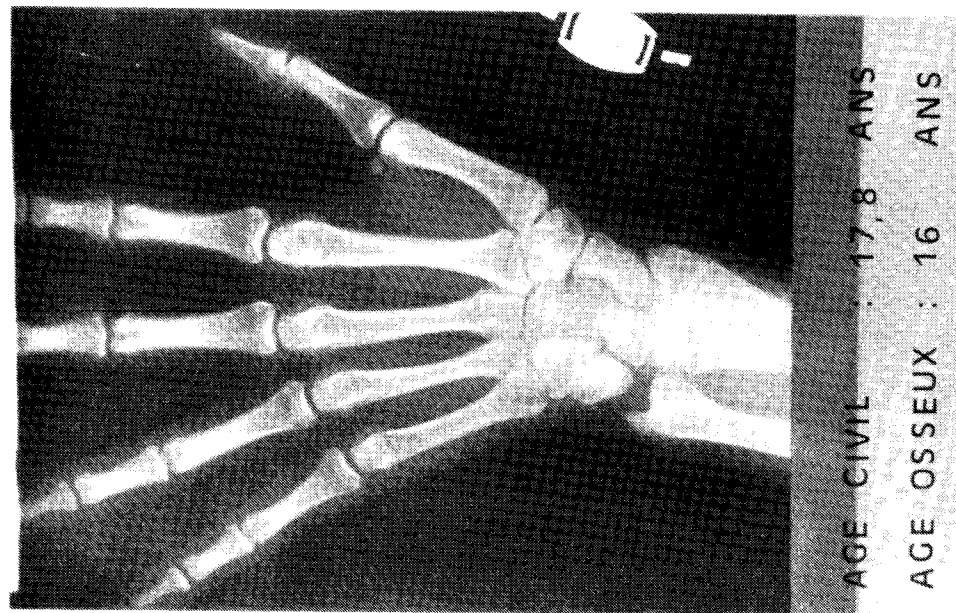
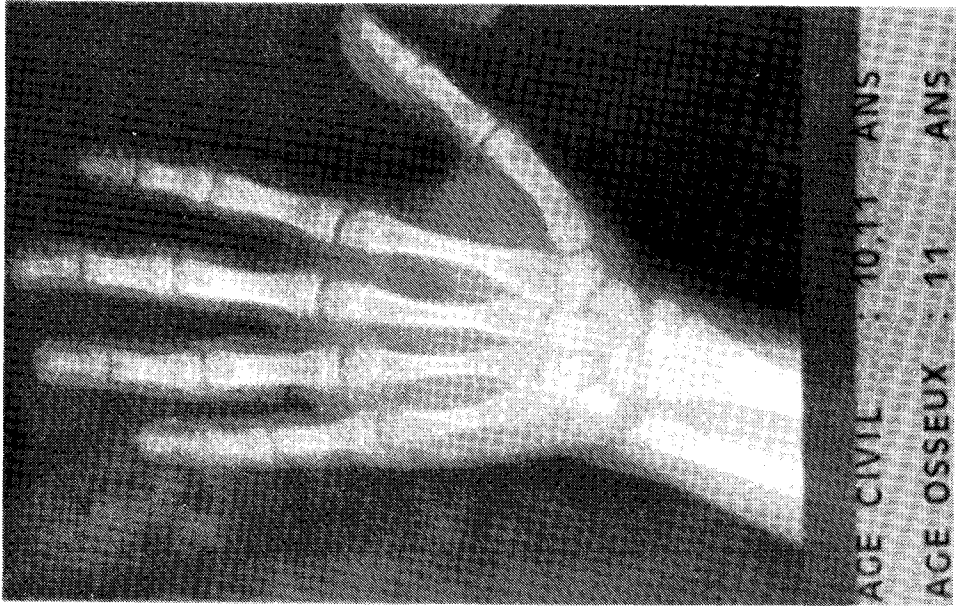
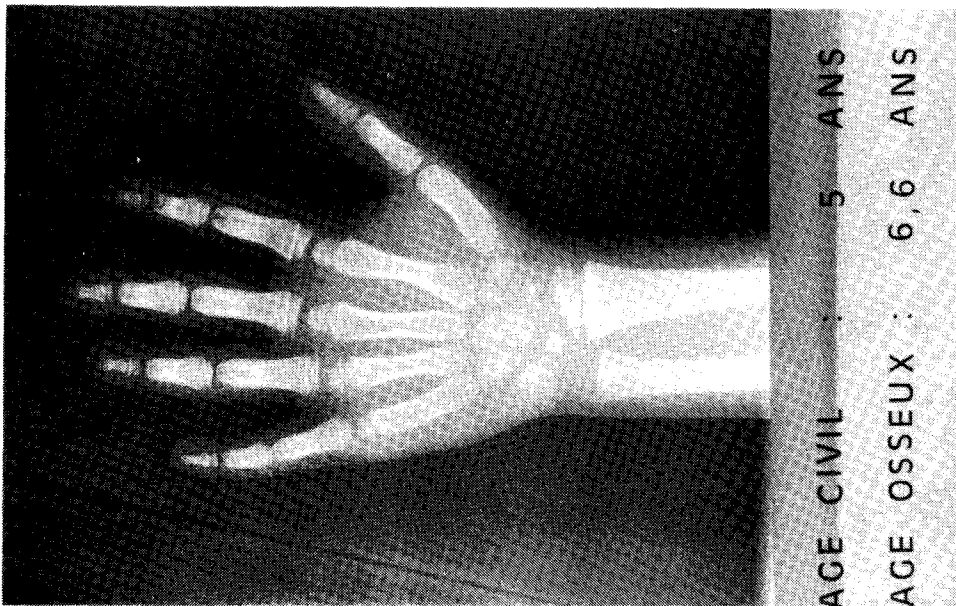


Fig. 6

RADIOGRAPHIE : *Maturation osseuse du poignet et de la main*
(sexe féminin)

- . les caractères biométriques (taille-poids)
- . le développement des caractères sexuels secondaires.

5) ETAPES DE LA CROISSANCE

Les différences qui affectent l'adulte et l'enfant dont le développement est en train de se réaliser, affectent non seulement les formes extérieures et les proportions corporelles mais aussi l'activité des divers organes et tissus. Les critères biomécaniques valables pour l'homme ne le sont pas forcément pour les enfants.

De nombreuses études ont tenté de repérer et de décrire les moments essentiels du développement biologique de l'enfant. Les querelles entre les spécialistes ont surtout porté sur la terminologie, l'ensemble des spécialistes étant d'accord sur la réalité des phénomènes de croissance et de maturation. Ces moments importants du développement sont désignés le plus souvent sous les termes de phases ou d'étapes.

VANDERVAEL (1980) propose les étapes suivantes :

a - Petite enfance

Elle s'étend de la naissance à deux ans et demi, c'est-à-dire jusqu'à la fin de la première dentition. Un accroissement en taille (40 %) et en masse corporelle (150 %) marque cette première étape.

b - Moyenne enfance

Elle s'étend de deux ans et demi à 6-7 ans. Elle marque un ralentissement relatif de l'accroissement staturo-pondéral et le début de la deuxième dentition. Le ventre est relativement important par rapport au thorax. Les reliefs osseux et musculaires n'existent pas. Le sujet est dit "enveloppé". La croissance staturale s'opère davantage en largeur qu'en hauteur.

c - Grande enfance

Elle s'étend de 7 ans jusqu'à l'apparition des premières manifestations de la puberté (10-11 ans chez les filles, 12-13 ans chez les garçons). On remarque d'abord une crise d'allongement général dominée par la croissance des membres inférieurs et dite phase de "dépouponnage" (Mac AULIFFE, 1923). Elle est suivie d'une deuxième phase où prédomine le développement en largeur.

d - Adolescence

Elle s'étend sur 5 à 6 ans, de 11 à 16-17 ans chez les filles et de 13 à 18-19 ans chez les garçons. Elle est divisée en deux phases :

- une phase prépubertaire qui dure deux ans, caractérisée par une poussée en largeur des membres inférieurs ;

- une phase pubertaire caractérisée par l'apparition des caractères sexuels propres à chaque sexe, l'allongement du tronc, l'augmentation du périmètre thoracique et des volumes musculaires. Mais la puissance musculaire correspondant au développement musculaire ne sera atteinte par le jeune adulte qu'un an plus tard (TANNER et al, 1962)

e - Jeunesse

Elle s'étend de la fin de la puberté à 20-21 ans chez les femmes et 24-25 ans chez les hommes. Elle correspond à la fin de la croissance osseuse et à l'ossification définitive du squelette. Les épiphyses vertébrales ne sont définitivement soudées aux corps vertébraux qu'aux environs de 23-24 ans.

L'achèvement de cette phase marque l'âge adulte.

6 - FACTEURS DE CROISSANCE

Les phénomènes de croissance et de maturation varient en fonction d'un certain nombre de facteurs :

- . les facteurs génétiques

- . les facteurs d'environnement
- . les facteurs sexuels.

a - Facteurs génétiques

Les études génétiques reposent surtout sur la connaissance biométrique des familles sur plusieurs générations ou sur le développement de jumeaux mono ou hétérozygotes, en liaison avec l'étude cytologique des gènes.

"Il paraît absurde de supposer l'existence d'un gène unique responsable de la taille car elle n'obéit pas aux lois de Mendel comme le daltonisme" (VANDERVAEL, 1980).

b - Facteurs d'environnement

Leur analyse est rendue difficile par l'intrication de différents facteurs dont les modifications sont le plus souvent liées et qui ne peuvent guère être "expérimentées" séparément.

a) *Ethnie*

Certaines races ont un développement biologique différent d'une autre race. Certaines sont grandes, les ariens, d'autres plus petites, les latins, sans que l'on ait pu donner d'explications satisfaisantes. Ce qui est certain, c'est que les plus petites races, mises dans les mêmes conditions de vie que les grandes races, rattrapent ces dernières en quelques générations. C'est le cas des Japonais et des Chinois en Amérique (TOMKIEWICZ, 1974).

β) *Milieu socio-économique*

La taille est d'autant plus haute et la croissance s'active d'autant plus vite que les personnes considérées vivent dans des pays plus riches et dans des conditions socio-professionnelles plus faciles. Le rôle de l'alimentation semble primordial ; les normes de poids et

et de tailles établies en France ne sont pas nécessairement valables en Afrique. De meilleures conditions de vie ont une influence sur le développement sexuel (*Fig. 7*).

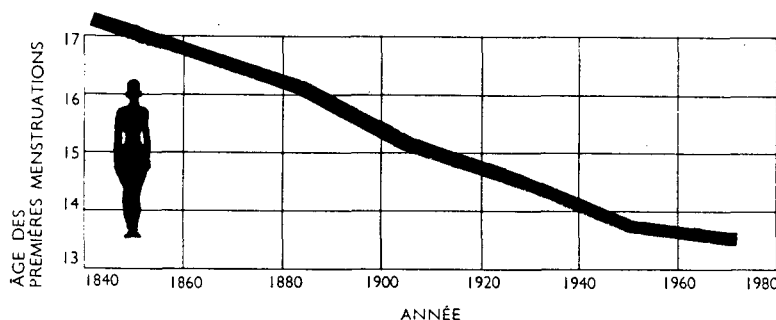


Fig. 7 - Age des premières menstruations

(TANNER et TAYLOR, 1974)

γ) Climat

Du point de vue climatique, le seul facteur objectif que l'on peut retenir est l'influence négative de l'altitude sur le poids à la naissance et sur la vitesse de croissance staturale (TOMKIEWICZ, 1974).

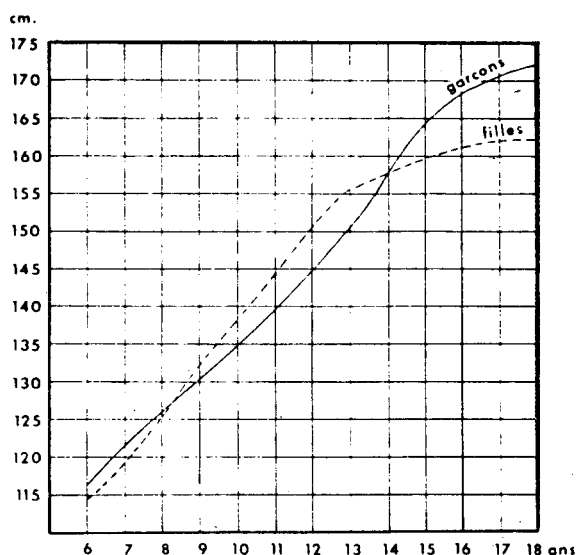
δ) Autres facteurs

Un certain nombre d'autres facteurs tels que les facteurs intra-utérins, le réchauffement planétaire ou l'environnement socio-affectif ne paraissent pas actuellement contrôlables (TOMKIEWICZ, 1974).

c - Facteurs sexuels

La croissance staturale des filles, en retard à la naissance, dépasse, à partir de huit ans, celle des garçons jusqu'à quatorze ans environ (*Fig. 8*).

Cette avance de croissance des filles, si manifeste au moment de la puberté, existe pendant toute la période de croissance. L'ossification du squelette, par exemple, est plus avancée chez elles, non seulement après la naissance mais pendant toute la vie foetale.



*Fig. 8 - Courbe de croissance de la taille
chez les garçons et les filles*

(VANDERVAEL, 1980)

"En d'autres termes, pendant tout leur développement, à âge chronologique égal, les filles ont un "âge physiologique" en avance sur celui des garçons" (VANDERVAEL, 1980).

Le phénomène de menstruation affecte particulièrement le développement musculaire. Des études dynamométriques (DAWSON, 1935) ont montré que la force musculaire des femmes diminue quelques jours avant le début de la menstruation et reste à un degré plus bas pendant toute la période menstruelle. Une étude de DÜNTZER (1930) portant sur 110 athlètes femmes, a montré que 55 % d'entre elles ne présentaient pas

de baisse d'efficacité, les performances de certaines étaient même augmentées pendant les jours de menstruation. Les performances des autres 45 % présentaient une diminution au cours de la menstruation ou bien immédiatement avant. Il reste certain que la force musculaire de la plupart des femmes est perturbée dans la période de menstruation.

B - DEVELOPPEMENT MUSCULAIRE

La littérature concernant la croissance musculaire est peu abondante et concerne presque exclusivement l'animal. L'étude du processus de maturation du muscle strié squelettique est compliquée par le fait que les muscles ne sont pas constitués de tissu homogène. De plus, la structure du tissu musculaire est très variable suivant le passé de l'individu considéré. Enfin, l'objet de ce travail étant d'étudier les qualités biomécaniques du muscle humain pendant la croissance, il paraît, pour toutes ces raisons, nécessaire de faire un bref rappel de la structure anatomique du muscle mature.

1) STRUCTURE DU MUSCLE MATURE

L'anatomie du muscle mature est parfaitement connue et figure dans de nombreux ouvrages. A l'intérieur de l'épimysium, on trouve des faisceaux de fibres musculaires, elles-mêmes composées de fibrilles musculaires dont l'assemblage donne à la fibre son aspect strié. Chaque fibre musculaire et ses myofibrilles sont composées dans leur longueur de sarcomères séparés par les lignes Z. Ces sarcomères paraissent être l'unité fonctionnelle du muscle (*Fig. 9 et 10*).

Une unité motrice (U.M.) est un ensemble de fibres musculaires innervées par les terminaisons nerveuses d'un même neurone.

Fig. 9

Organisation générale de la cellule musculaire striée.

a) Vue générale

b) Plus fort grossissement
d'après BERKALOFF et al
(1976).

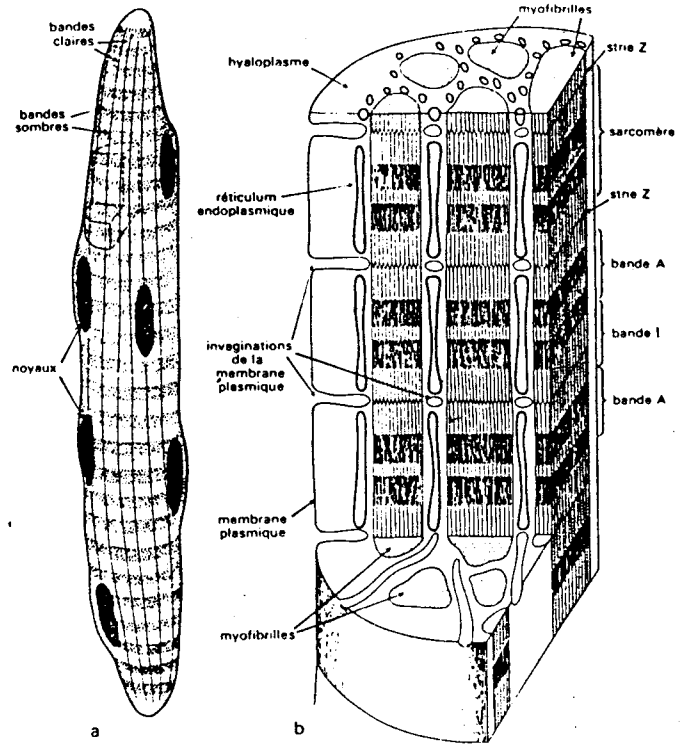


Fig. 10

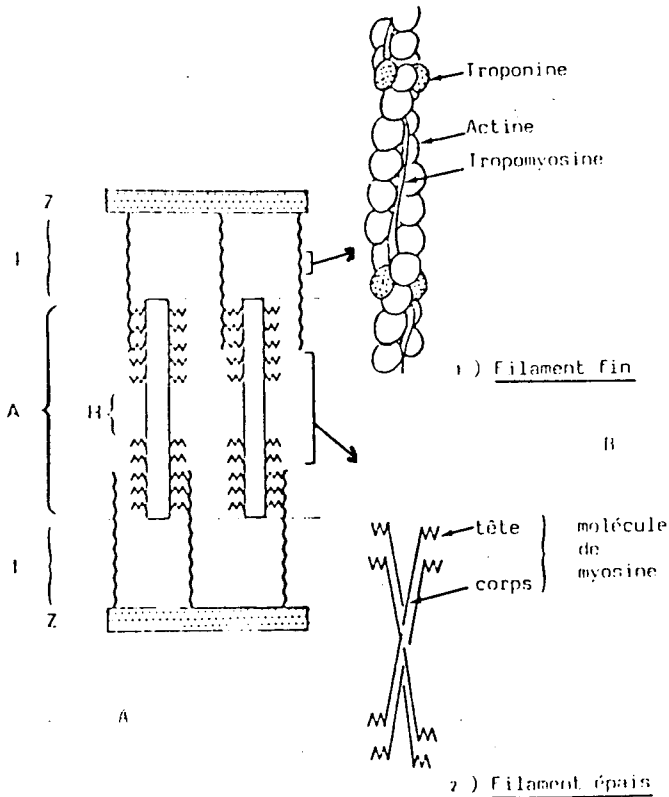
Le sarcomère

a) Structure d'ensemble
(HUXLEY, 1969)

b) Organisation des myofi-
laments à l'échelle molé-
culaire.

1 - Filaments d'actine
(EBASHI et ENDO, 1968)

2 - Filaments de myosine
(HUXLEY, 1972)



2) CROISSANCE DU MUSCLE

HAINES (1932) énonce deux lois :

- a) la longueur du muscle représente une proportion constante de la distance entre ses insertions ;
- b) le muscle croît en fonction des tractions dues à la croissance des os auxquels il est fixé.

COMER (1956) cherche à vérifier ces lois sur des rats de 0 à 60 jours, sur lesquels est entretenue une activité musculaire par stimulation. Il conclut que la longueur de l'os, du tendon et du muscle concerné est parfaitement corrélée aux différents âges ($r = 0.95$). Il montre aussi, par des techniques de mobilisation et d'immobilisation articulaire, qu'il y a une bonne corrélation (0.80) entre l'ampleur articulaire des mouvements provoqués et la longueur de la partie contractile du muscle.

3) CROISSANCE DES FIBRES MUSCULAIRES

Pour des raisons liées à des difficultés expérimentales et à des problèmes d'éthique, les recherches ne sont principalement orientées vers de petits animaux dont la musculature est adaptée à ce type d'analyse (*ROWE, 1967*). De 1967 à 1973, de nombreux travaux portent sur l'étude de la fibre musculaire et l'augmentation de ses dimensions pendant la croissance (*GOLDSPINK, 1971 ; WILLIAMS et GOLDSPINK, 1973 et TARDIEU et al, 1977*). Ils tentent de localiser la région d'allongement de la fibre. Par comptage des sarcomères, ces auteurs ont déterminé que l'allongement des fibres était dû à une augmentation importante du nombre de sarcomères qui se produit chez la souris dans les trois premières semaines après la naissance et s'opère par addition en série, aux extrémités des fibres. *TARDIEU et al (1974, 1976), TABARY et al (1976)* étudient le rapport entre la longueur du sarcomère et la position articulaire, donc la longueur du muscle.

Les sarcomères situés aux extrémités des fibres sont plus courts que ceux de la région équatoriale et ceci à tous les âges.

Quand des muscles jeunes sont stimulés au-delà de la longueur de repos, 60 % des sarcomères augmentent de longueur uniquement au milieu de la fibre musculaire. Lorsqu'un membre est placé en extension complète, les sarcomères du fléchisseur augmentent de $2,3 \mu$ à $2,8 \mu$ pendant la croissance. L'augmentation en longueur du sarcomère est due à une diminution des zones de recouvrement des filaments et non à une variation de longueur de ces filaments (*GOLDSPINK, 1968*). Le même auteur montre aussi que les sarcomères polaires ne sont pas étirés lors d'une extension du muscle jeune. Il les déclare non-fonctionnels.

En période de croissance, des expériences d'immobilisation à différents angles articulaires ont montré qu'il était possible, chez le muscle immature de perturber la moyenne et l'augmentation du nombre de sarcomères (*TARDIEU, 1977*). Il est intéressant de noter que les mêmes immobilisations produisent les mêmes effets sur les mêmes types de muscles adultes (*WILLIAMS, 1973*).

L'augmentation de volume du muscle au cours de la croissance s'explique par l'augmentation de la section des fibres musculaires (jusqu'à quarante fois). Les tubules transverses et le système du réticulum sarcoplasmique subissent le même accroissement. *GOLDSPINK (1971)*, *STICKLAND et GOLDSPINK (1973)* et *STAUN (1968)* démontrent que le nombre de fibres est négativement corrélé avec leur section transversale. *STICKLAND et GOLDSPINK (1973)* travaillant sur des animaux de boucherie ont démontré :

- . que le nombre de fibres d'un même muscle était sensiblement le même pour des animaux de la même race ;
- . que le nombre de fibres pouvait varier de 200 % suivant les races pour un même muscle.

En 1970, *CRAGGS* décrit un processus de division longitudinale des myofibrilles dans le muscle strié. *GOLDSPINK (1971)* démontre que les fibres se subdivisent sous l'action de mise en tension rapide de la zone Z entre les sarcomères. *GONYEA (1980)* décrit le même phénomène de division des fibres musculaires.

4) MATURATION DES TYPES DE FIBRES ET DES UNITES MOTRICES (U.M.)

a - Maturation des fibres musculaires

Le muscle mature est composé de différents types de fibres (CLOSE, 1972). Leur classification est basée sur l'activité enzymatique mise en évidence par marquage histochimique. BURKE *et al* (1973) classent les fibres selon des critères histologiques, mécaniques et d'excitabilité en trois types :

- S.R. (slow twitch : fatigue résistante) à contraction lente et très résistantes à la fatigue (Fibres de type I selon BROOKE *et KAISER*, 1970) ;
- F.R. (fast twitch : fatigue résistante) à contraction rapide et résistantes à la fatigue (Fibres de type IIA selon BROOKE *et KAISER*, 1970) ;
- F.F. (fast twitch : fast fatigue) à contraction très rapide et très rapidement fatigables (Fibres de type IIB selon BROOKE *et KAISER*, 1970).

BROOKE *et al* (1974) montrent que les fibres de type IIC parfois rencontrées dans certaines préparations sont, en fait, des fibres indifférenciées capables de se développer ultérieurement, soit en type IIA, soit en type IIB.

Ce classement et ces caractéristiques fibrillaires peuvent être appliquées aux mammifères et à l'homme (Mac CARTER, 1978).

KUGELBERG (1976) étudie l'évolution des types de fibres musculaires pendant la croissance chez le rat de 5 à 34 semaines. Il constate que le nombre de fibres de type II (temps de contraction 15 à 26 millisecondes), passe de 33 % à 10 % au profit des fibres de type I (27 à 40 millisecondes de temps de contraction) qui passent inversement de 67 % à 90 %. Cette transformation des fibres de type II en type I pendant la croissance correspond au changement de propriétés des motoneurones qui évoluent du type phasique vers le type tonique. Le changement est caractérisé par un

abaissement de fréquence de leur décharge (HANNERZ, 1974), par une hyperpolarisation plus longue (ECCLES *et al*, 1958), par une vitesse de conduction axonale plus réduite (APPELBERG *et* EMONET-DENAND, 1967) et des terminaisons nerveuses morphologiquement différentes (PADYKULA *et* GAUTIER, 1970). Ainsi, le motoneurone détermine les caractéristiques histologiques et fonctionnelles des fibres musculaires de l'unité motrice qu'il innerve.

KUGELBERG (1980) et MARTIN (1978) semblent d'accord sur le fait que ce mécanisme de transformation des fibres de type II en fibres de type I n'est pas uniquement programmé génétiquement mais est un processus adaptatif en relation avec la croissance osseuse et pondérale des segments considérés. Avec la croissance, l'augmentation des forces nécessaires à la mobilisation des segments, conduit les motoneurones à transformer le type d'activité de certaines fibres musculaires. Pour vérifier cette hypothèse, (MARTIN, 1978) impose à des rats des épreuves de courses à grande vitesse, nécessitant des temps de contraction très courts. Il constate, après examen, que ces rats ont conservé un pourcentage de fibres de type II plus élevé que les rats témoins. D'après cet auteur, l'inverse de ce résultat est obtenu si, pour des rats placés dans une centrifugeuse, la gravité supérieure à la normale entraîne une surcharge d'activité musculaire de type statique.

Ces résultats paraissent fort intéressants pour le mouvement humain (travail et sport) et méritent sans doute que le phénomène de maturation musculaire soit mieux connu pour envisager des pratiques physiques mieux ajustées chez l'enfant.

b - Maturation des unités motrices (U.M.)

La voie finale commune de toute commande volontaire est le motoneurone α , elle s'exprime au niveau périphérique par la mise en jeu d'un certain nombre d'unités fonctionnelles appelées "unités motrices" (SHERRINGTON, 1925). Une U.M. comprend l'ensemble formé par le motoneurone α , son axone moteur ainsi que les fibres musculaires innervées par son axone (BUCHTHAL, 1962). Au sein d'une même U.M., les fibres musculaires sont de type homogène, répondent toutes simultanément à un stimulus déclenché au niveau de

leur plaque motrice (*PATON et WAUD, 1967*) et varient en nombre et en taille d'une unité à l'autre. Il est reconnu que, dans le muscle mature, les petites et les grandes U.M. sont innervées respectivement par des neurones de petite et grande section. *HENNEMAN et coll. (1965 a, b)* ont montré que, lorsque l'intensité de stimulation augmente, les petits motoneurones sont activés avant les gros. Inversement, pendant la réduction progressive du niveau de force, ce sont les petits neurones qui sont désactivés les derniers.

DESMEDT et GODEAUX (1977 a,b ; 1979) ont montré d'une façon indiscutable que, dans une contraction rapide, les petites U.M. sont recrutées les premières et les grandes U.M., ensuite. Ces conclusions sont en parfait accord avec le concept de "grandeur" de *HENNEMAN (DUCHATEAU, 1981)*.

Ce recrutement spatial se double d'un recrutement temporel lié à l'augmentation de la fréquence de battement des U.M., lorsque la vitesse du mouvement anisométrique augmente (*MATON, 1975*).

Chez les animaux nouveau-nés, la dimension des motoneurones est la même (*CONRADI, 1976*). Le mécanisme qui préside à la différenciation des U.M. semble totalement dépendant des motoneurones et de leur maturation. Pendant le développement post-natal, toutes les U.M. sont très grandes et chaque motoneurone innerve un très grand nombre de celles-ci (*BAGUST et al, 1973 ; BROWN et al, 1976*). Les fibres musculaires sont donc polyinnervées. Ces U.M. s'individualisent pendant le développement post-natal par le procédé d'élimination des contacts "superflus". Finalement chaque fibre sera alimentée par un seul axone et un seul motoneurone à l'intérieur de son U.M. (*BENOIT et CHANGEUX, 1975 ; O'BRIEN et al, 1978*). La dimension de l'U.M. est finalement dépendante du nombre de contacts que le motoneurone est capable de maintenir avec chaque fibre. Le stade actif de l'élimination des innervations polyneurales "superflues" correspond à l'augmentation de l'activité de l'animal, seize jours chez le rat (*REDFERN, 1970*).

CLOSE (1964) prouve, sur de jeunes rats (de 1 à 100 jours), que les temps de contraction des muscles rapides, tel l'extensor digitorum longus (E.D.L.) et des muscles lents, tel le soleus (SOL), diminuent mais dans des proportions différentes (*Fig. 11*).

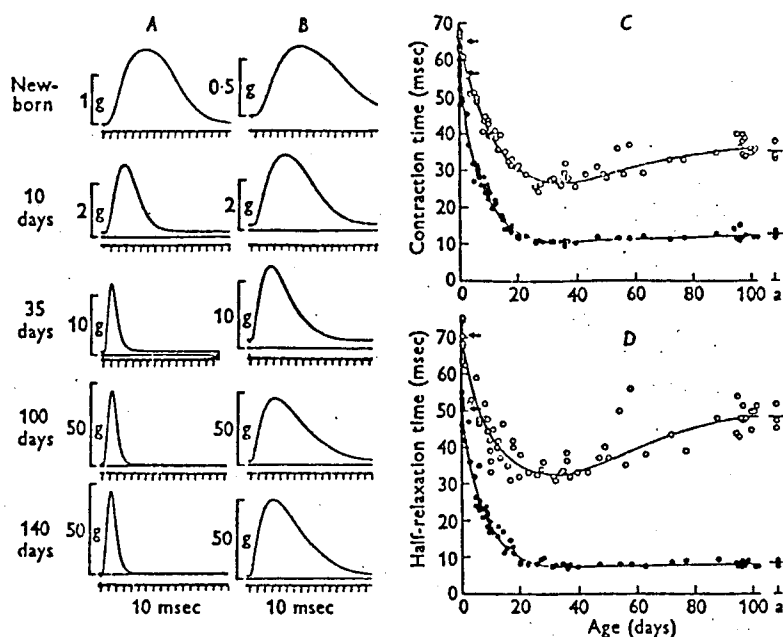


Fig. 11 - Relations temporelles dans la contraction isométrique de l'EDL et du Sol à des époques variées du développement du rat.

- . Les courbes de temps de l'EDL sont représentées en A.
- . Les courbes de temps du Sol sont représentées en B.
- . L'âge des animaux est indiqué en colonne verticale à gauche.
- . Les temps de contraction et de semi-relâchement pour l'EDL (●) et pour le Sol (○), en fonction des âges, sont représentés à droite.

(CLOSE, 1964)

En résumé, chez les rats nouveau-nés, les différentes propriétés des U.M. ne sont pas différenciées (CLOSE, 1964 ; BAGUST *et al*, 1973). Elles développent leurs spécificités fonctionnelles quelques semaines après la naissance (GUTMANN *et al*, 1974). Pendant les cent premiers jours après la naissance, le temps de contraction diminue, alors que, de la 5^{ème} semaine à la 34^{ème} semaine, un certain pourcentage de fibres de type II (rapides) se transforment en fibres de type I (lentes). CLOSE (1964), BROWN (1973) concluent que le muscle augmente sa vitesse de contraction au début de la croissance.

5) PROPRIETES MECANIQUES DU MUSCLE ET DU MOUVEMENT

D'un point de vue biomécanique, le muscle adulte est celui qui a fait l'objet des études les plus détaillées et reste, de ce fait, la référence réellement utilisable pour l'étude du muscle au cours de son développement. Dans le but de comprendre son fonctionnement, des modèles théoriques aptes à caractériser ses propriétés biomécaniques ont été construits. Le modèle de *HILL (1938)* reste "a popular analog tool to study muscle mechanics" (*WONG, 1971*). Il est applicable à l'homme. Ce modèle est constitué d'une composante contractile (C.C.) et d'une composante élastique série (C.E.S.) auxquelles s'est ajoutée, par la suite, une composante élastique parallèle (C.E.P.) (*Fig. 12*).

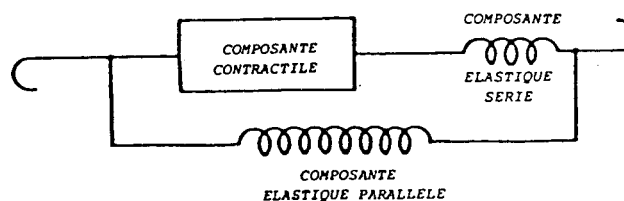


Fig. 12 - Modèle de muscle à trois composantes

d'après GOUBEL et VAN HOECKE (1982)

Le muscle en contraction est caractérisé par les propriétés de sa C.C. et de sa C.E.S.

L'étude *in vivo* des propriétés du muscle humain est toujours réalisée à partir de la notion de muscle équivalent (*PERTUZON et BOUISSET, 1971*). Les expérimentations sont toujours conduites à partir de deux types de contractions volontaires, la contraction isométrique et la contraction anisométrique.

a - Contraction isométrique volontaire

Elle permet de caractériser la C.C., à partir de données articulaires (relation couple-angle), en caractéristiques musculaires (relation force-longueur).

α) Relation couple-angle (isométrique)

A chaque valeur d'angle de l'articulation correspond une valeur du couple d'un groupe musculaire (*Fig. 13*). La relation présente l'allure d'une courbe le plus souvent à maximum déjà notée par *FRANKE (1920)*. Les relations couple-angle sont différentes d'un muscle équivalent à l'autre.

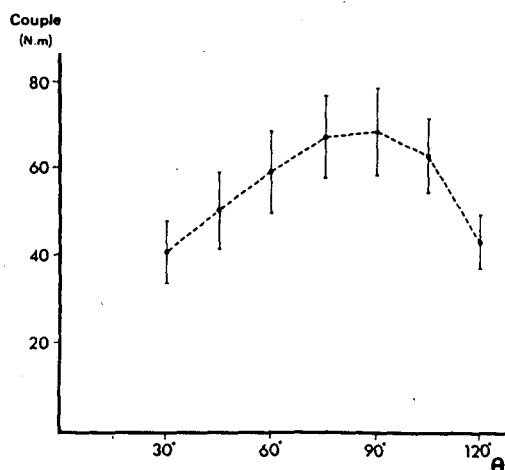


Fig. 13 - Relation entre le couple maximal de flexion isométrique (C) et l'angle de l'articulation du coude (θ), compté à partir de l'extension complète.

La valeur de l'écart-type est portée de part et d'autre de chaque valeur moyenne, calculée sur les cinq sujets.

(PERTUZON, 1972)

Dans le cas de l'articulation du coude, les angles étant mesurés à partir de la position d'extension de l'avant-bras sur le bras, le couple

maximum de flexion est développé pour un angle voisin de 90° (PERTUZON, 1972), pour un angle voisin de 80° (GOUBEL et VAN HOECKE, 1982). Ce couple décroît plus vite pour les angles supérieurs à l'angle du couple optimum, que pour les angles inférieurs, comme l'avaient déjà constaté LIBERSON et al (1962) et FIDELIUS (1968).

La relation couple-angle est intéressante pour les gestes sportifs ; elle renseigne sur l'angle optimal de la performance isométrique (GOUBEL et VAN HOECKE, 1982). Les notions de chaînes musculaires et articulaires compliquent cette approche, les gestes mettant en jeu, le plus souvent, plusieurs chaînons corporels donc plusieurs articulations.

β) Relation force-longueur

Décrite dès 1893 par BLIX sur le muscle isolé et tétanisé, cette relation s'obtient en mesurant la force isométrique maximale développée à chaque longueur. On peut calculer cette force rapportée à la longueur du muscle équivalent à partir des données de la relation "couple-angle". Globalement, la force du muscle croît avec sa longueur. Cependant, au-delà d'un certain degré d'étirement, il y a une diminution de cette force due à une tension passive qui grandit exponentiellement avec la longueur : il s'agit là de la C.E.P. (Fig. 14). Ceci explique que la courbe force-longueur présente une grande variété de formes suivant la richesse du muscle considéré en structures élastiques parallèles (MARECHAL et CASTEELS, 1976).

L'accès direct au diagramme force-longueur n'a pu être réalisé que chez l'amputé (RALSTON et al, 1947). Chez l'homme normal, la mesure de ces variables mécaniques ne peut se faire qu'au travers de la complexité du système musculo-osseux.

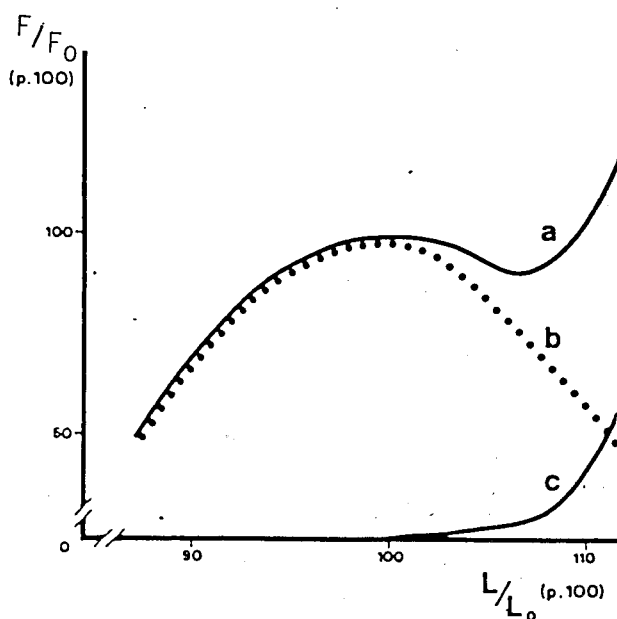


Fig. 14 - Relation force-longueur isométrique

La relation caractéristique de la composante contractile (b) s'obtient en déduisant de la relation globale (a) la contribution de la composante élastique parallèle (c).

F/F_0 : force normalisée, exprimée en pourcentage de la force isométrique maximale F_0 .

L/L_0 : longueur normalisée, exprimée en pourcentage de la longueur standard L_0 .

b - Contraction anisométrique volontaire

A partir de ce type de contraction, on peut établir les relations force-vitesse.

En analysant des mouvements maximaux de flexion du coude effectués avec différents volants d'inertie, HILL (1922) et LUPTON (1922) furent les premiers à montrer que la force (F) développée par le muscle

décroît lorsque sa vitesse (V) de raccourcissement augmente. HILL (1938) dégage pour le muscle isolé le modèle mathématique encore utilisé :

$$(F + a) (V + b) = (F_0 + a)b = \text{constante.}$$

a est une constante de force ;

b est une constante de vitesse ;

F_0 est la valeur maximale de la force sous vitesse nulle ;

V_0 est la valeur maximale de la vitesse sous charge nulle.

Quand $V = 0$ $F = F_0$ quand $F = 0$ $V = V_0$

donc $(F + a) (V + b) = (F_0 + a)b = (V_0 + b)a$

$(F_0 + a)b = (V_0 + b)a$ d'où $F_0b = V_0a$

donc $b = a \frac{V_0}{F_0}$

Le terme $(F_0 + a)b$ est donc constant et la courbe force-vitesse (FV) est une hyperbole (Fig. 15).

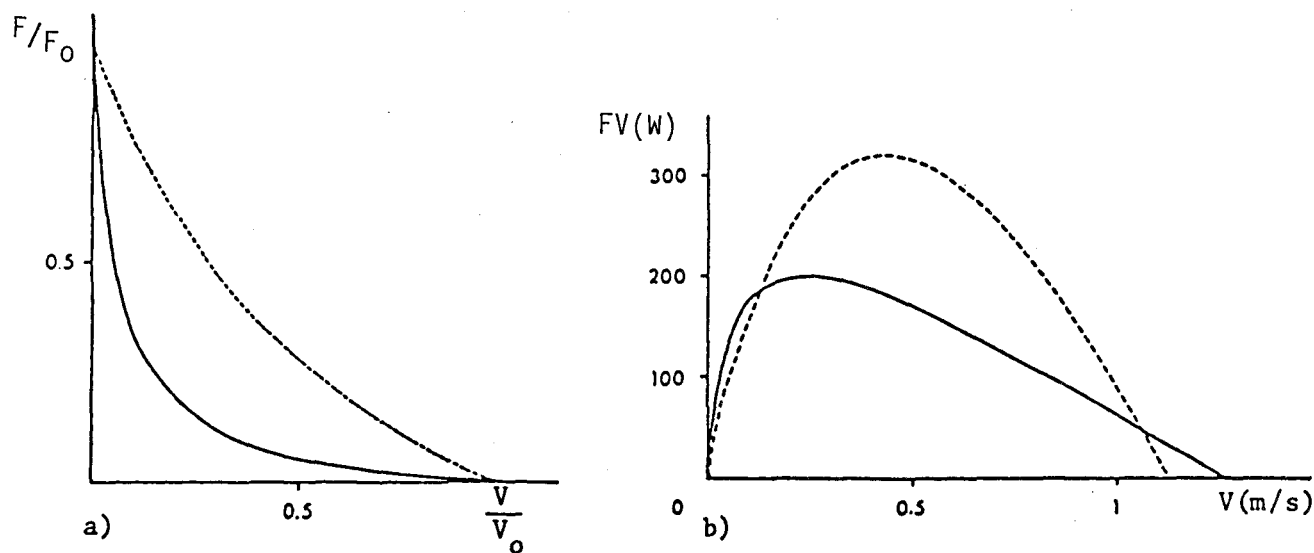


Fig. 15 - Relations force-vitesse (a) et puissance-vitesse (b) de l'extenseur (—) et du fléchisseur (---) équivalents

F/F_0 : force normalisée par rapport à la force isométrique maximale.

FV : puissance développée par le muscle, en watts.

V : vitesse de raccourcissement, en m/s.

Résultats obtenus chez l'homme in situ par CNOCKAERT (1976).

Cette équation caractéristique de *HILL* est valable en steady-state (F, V et niveau d'excitation constants). On peut la retrouver aussi à partir de la formulation mathématique de la théorie des filaments glissants (*HUXLEY*, 1957). Cette équation présente des caractéristiques différentes selon que le muscle est lent (riche en fibres de type I ou S.T.) ou rapide (riche en fibres de type II ou F.T.). En effet, la vitesse V_0 et le rapport a/F_0 (qui rend compte de l'incurvation de la courbe) sont plus élevés pour un muscle rapide (*CLOSE*, 1972 ; *GOUBEL et VAN HOECKE*, 1982) que pour un muscle lent. La relation force-vitesse a l'avantage de permettre le calcul immédiat de la puissance ($F \times V$).

Pour ce qui est de l'activité du muscle in situ, *WILKIE* (1950) avait tenté d'établir la relation force-vitesse dans des conditions aussi proches que possible de celles de *HILL* sur le muscle isolé. Il en avait conclu que, moyennant un contrôle du niveau d'excitation du muscle, cette relation force-vitesse était applicable au muscle humain. Plus récemment (*PERTUZON*, 1972), des relations force-vitesse ont pu être établies pour le groupe des fléchisseurs du coude au cours de mouvements volontaires maximaux à niveau d'excitation instantané, constant.

c - Elasticité musculaire

La composante élastique série (C.E.S.) assure la liaison entre la C.C. du muscle et l'impédance mécanique externe sur laquelle la force de la C.C. s'exerce. Les variations de longueur de la C.E.S. dépendent donc des variations de longueur respectives de la C.C. et du muscle (déplacement de l'impédance mécanique externe). Cette définition n'implique pas que la C.C. et la C.E.S. soient morphologiquement distinctes à l'intérieur du muscle : il est admis que la C.E.S. est localisée au niveau des structures passives (tendons) et des interactions actine-myosine (*BRESSLER et CLINCH*, 1974). La C.E.S. emmagasine de l'énergie mécanique en quantité plus ou moins importante selon son extensibilité et la restitue ensuite. Ce processus de "stockage-restitution" d'énergie potentielle permet à la

C.E.S. de jouer un rôle important dans l'amélioration de la performance (GOUBEL et VAN HOECKE, 1982).

WILKIE (1950) fut sans doute le premier à calculer la compliance (K) de la C.E.S. sur le muscle humain à partir de la notion de muscle équivalent :

$$K = \Delta L / \Delta F$$

ΔF : différence de force entre deux instants à préciser

ΔL : différence de longueur du muscle à ces deux instants.

La méthode la plus utilisée est la méthode de "quick-release" (QR) (FENN et al, 1931). Elle consiste à relâcher brusquement un muscle préalablement étiré, maintenu en état de contraction isométrique à un angle donné. La C.E.S. d'abord étirée emmagasine de l'énergie potentielle qu'elle restitue au moment du relâchement, cependant que la C.C. est supposée ne pas présenter de modification immédiate de longueur. ΔL et ΔF seront mesurés aussitôt après le relâchement brusque et avant que la longueur de C.C. ne se modifie.

Quelle que soit la méthode utilisée pour ces calculs, les résultats s'expriment soit en terme de raideur $\Delta F / \Delta L$, soit en terme de compliance (K) ou extensibilité $\Delta L / \Delta F$. Les valeurs de compliance ($K = \Delta L / \Delta F$) se présentent sous forme de relation non linéaire (WILKIE, 1950 ; GOUBEL et al, 1971 ; CLOSE, 1972 ; PERTUZON, 1972 ; GOUBEL, 1974) (Fig. 16).

Sur la figure 16, on constate que la compliance (K) diminue en fonction de la force. De plus, les extenseurs sont moins compliants que les fléchisseurs (CNOCKAERT, 1976). On peut donc penser que les extenseurs sont plus riches en fibres de type I (S.T.) à contraction lente (WELLS, 1965). La mesure de la compliance de la C.E.S. sur le muscle in situ par la méthode de Q.R. utilisée par PERTUZON et BOUISSET (1971), GOUBEL et PERTUZON (1973), CNOCKAERT et PERTUZON (1974), VANHOECKE et al (1980) sur différents groupes musculaires, pose deux problèmes de méthode :

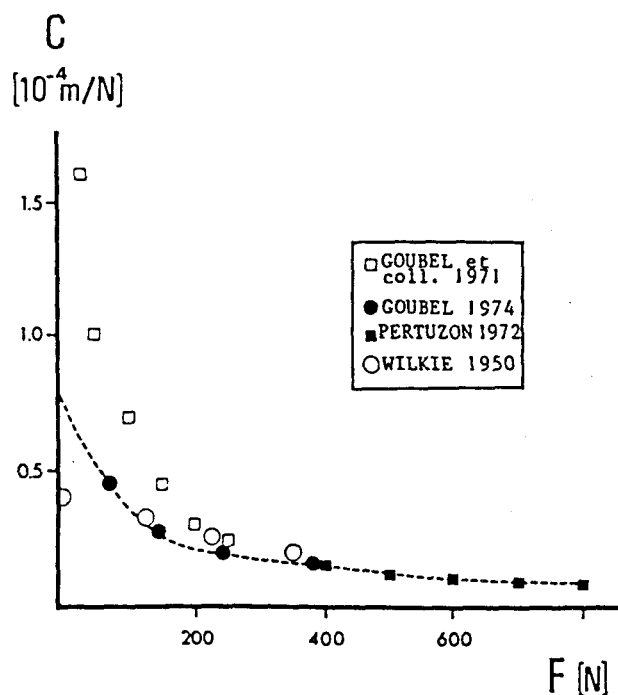


Fig. 16 - Relation compliance-force du fléchisseur équivalent.
Résultats obtenus chez l'homme in situ.

(GOUBEL et VAN HOECKE, 1982)

a) l'inertie opposée au mouvement par le segment mobile ne permet pas un raccourcissement instantané de la C.E.S. ;

b) la latence d'un réflexe "d'unloading", décrit par ANGEL et al (1965) est d'environ 40 millisecondes. Ce réflexe est approximativement contemporain d'un réflexe d'étirement des muscles antagonistes. Dans ces conditions, on estime que la mesure de la compliance de la C.E.S. est quand même possible entre le début du mouvement et la date d'apparition des activités réflexes.

d - Propriétés mécaniques du muscle et croissance

Il ne semble pas que des études précises aient été conduites sur les modifications des propriétés mécaniques du muscle en cours de développement chez l'homme. Par contre, des travaux ont été réalisés sur l'animal (GOLDSPINK, 1968 ; CLOSE, 1972 ; TARDIEU et al, 1977). Les

muscles fléchisseurs adultes de mammifères présentent un maximum de tension pour des longueurs équivalentes à l'extension complète de l'articulation (1.08 lo), alors que le maximum de tension développé par le muscle isolé de jeunes mammifères est atteint pour des longueurs allant jusqu'à 1.20 lo (LENSEL, 1978). On peut donc penser que la forme des relations "force-longueur" obtenues pour des muscles jeunes pourrait être différente de celle des relations "force-longueur" obtenues pour des muscles adultes. GOLDSPIK (1968) attribue ces résultats à la présence de sarcomères "non-fonctionnels" en position polaire dans les muscles jeunes ; la non-fonctionnalité étant définie comme une absence de variation de longueur des sarcomères considérés pendant le raccourcissement musculaire. A l'inverse, TARDIEU *et al* (1977) démontrent que la forme de la relation "force-longueur" obtenue sur des chats et des chattons ne fait apparaître aucune différence en valeurs normalisées.

D'un travail réalisé sur de jeunes rats, CLOSE (1964) tire les conclusions suivantes :

a) A la naissance, les muscles à contraction rapide comme l'extensor digitorum longus (EDL) et les muscles à contraction lente comme le soleus (SOL) ont une forme de secousse isométrique identique. Le développement ultérieur amène des diminutions dans le temps de contraction et une augmentation de la fréquence optimale pour une stimulation répétitive.

b) Les propriétés force/vitesse des EDL et SOL sont en pratique identiques à la naissance. Par la suite, la vitesse de raccourcissement par sarcomère est multipliée par 2,5 à 3 pour les muscles EDL alors qu'elle ne subit que peu de changement pour le SOL.

c) Par des preuves indirectes, il affirme que la compliance de l'EDL et du SOL changent très peu pendant la croissance.

C - OBJECTIF DE L'ETUDE ET CHOIX DE LA PRÉPARATION

1) BUT DE L'ETUDE

Dans cette étude, nous nous proposons d'examiner, sur des populations d'enfants et d'adolescents des deux sexes, quelques étapes du développement musculo-squelettique et de les caractériser au moyen de méthodes non invasives.

C'est ainsi que nous étudierons et comparerons :

- . Les caractéristiques anthropométriques : grandeurs linéaires, massiques et inertielles ;
- . Le degré de maturation du squelette ;
- . Les propriétés mécaniques fondamentales du groupe musculaire des fléchisseurs du coude.

2) CHOIX DE LA PREPARATION ET DU MOUVEMENT

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

a) Le mouvement doit concerner une articulation dont la géométrie est simple ;

b) Peu de muscles doivent être mis en jeu dans le mouvement ;

c) Le mouvement ne doit pas perturber la fixité du reste du corps ou, pour le moins, la posture générale doit pouvoir être fixée en ne laissant s'effectuer que le mouvement étudié ;

d) Le mouvement doit pouvoir être reproductible aussi précisément que possible ;

e) Le mouvement doit être unidirectionnel ;

f) Au cas où une articulation présente plusieurs degrés de liberté, il convient d'en réduire le nombre et de n'en étudier qu'un.

Le mouvement de flexion du coude du membre supérieur droit, dans un plan horizontal, répond à ces critères et fera l'objet de notre étude.

3) CONDITIONS D'INTERPRETATION EN TERME DE MUSCLE

a - Position d'équilibre articulaire

Dans l'étude d'un muscle isolé, la référence est choisie par rapport à la longueur de repos du muscle (*LENSEL, 1978*). Mais lorsqu'il s'agit d'un groupe musculaire, formé d'agonistes et d'antagonistes, il est préférable d'étudier les mouvements en référence à une position standard dans laquelle les forces de tension entre agonistes et 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*).

b - Notion de muscle équivalent

Dans un mouvement nécessitant la mise en jeu de plusieurs muscles ou d'un muscle ayant plusieurs chefs, chaque muscle développe une force. La force déployée et la force externe mesurée au niveau du segment déplacé est la résultante des forces musculaires individuelles, compte tenu de leur géométrie musculo-squelettique. L'étude de l'activité musculaire dans un mouvement choisi devra donc être faite par rapport à un muscle que l'on aura déterminé comme étant le plus représentatif du mouvement étudié (*PERTUZON, 1972*).

Il en résulte que les différents fléchisseurs (biceps brachii, brachio radialis, pronator teres, brachialis) ne participent pas tous de la même façon au mouvement mais nous pourrions considérer le biceps en tant que fléchisseur équivalent.

c - Muscle et activité électrique

Selon *ADRIAN et BRONK (1929)*, la gradation de la contraction musculaire volontaire peut se faire par deux mécanismes au niveau de l'unité motrice (U.M.) :

- un accroissement du nombre d'U.M. actives (recrutement spatial) ;
- une augmentation de la fréquence de décharge des U.M. déjà actives (recrutement temporel).

L'activité des motoneurones est asynchrone pour des contractions légères et la synchronisation devient d'autant plus forte que l'intensité de la contraction est importante (*PERSON et KUDINA, 1968 ; WOODBURY et al, 1965*) ont montré que la synchronisation n'était appréciable que dans le cas de tensions élevées ou de fatigue musculaire.

Nous travaillerons donc sur des contractions en mouvement volontaire maximal.

L'activité musculaire sera détectée et contrôlée à l'aide d'électrodes de surface qui offrent l'avantage de détecter l'activité électrique de l'ensemble du muscle, à condition de placer les électrodes de façon judicieuse (*BUCHTAL et ROSENFALCK, 1957 ; VIGREUX, 1977*). Cependant, cette dernière méthode limite l'étude aux fibres superficielles. Mais *BOUISSET et MATON (1972)* ont montré que pour une contraction donnée, l'activité des fibres proches de la surface est représentative de l'activité de l'ensemble des fibres impliquées dans cette contraction.

L'électromyographie de surface permet donc d'apprécier correctement le niveau global d'excitation et sera choisie dans notre étude.

La quantification de l'EMG sera déterminée soit par l'amplitude des oscillations, soit par évaluation de la quantité d'électricité débitée par le muscle.

L'amplitude des oscillations de part et d'autre de la ligne isoelectrique doit rester constante un certain temps. Cette technique ne peut être utilisée que dans le maintien d'une contraction isométrique.

La lecture directe de l'EMG nous sera utile pour analyser d'éventuelles modifications des tracés en cours d'expérimentations.

Le système d'intégration utilisé consiste à évaluer la quantité totale d'électricité débitée par le muscle pendant un intervalle de temps donné. Il s'agit d'une intégration réelle qui est réalisée à l'aide d'un système électronique intégrateur. Celui-ci est constitué par un étage amplificateur contre-réactionné par un condensateur.

Le signal est employé pour décharger le condensateur à un niveau de charge prédéterminé : l'EMG se traduit alors par des impulsions brèves ou "pips" qu'il suffit de compter (FEUER, 1967).

4) HYPOTHESES

Pendant la croissance staturo-pondérale et la maturation musculaire, les enfants et les adolescents des deux sexes deviennent de plus en plus forts et rapides. Nous nous proposons, par une analyse biomécanique non-invasive, de mesurer l'importance de quelques paramètres (force, vitesse, compliance) de ce changement, entre cinq et vingt-quatre ans.

Chaque étape de la croissance possède-t-elle la faculté de développer plus spécialement certaines propriétés musculaires ?

Le développement de ces qualités est-il linéaire ou au contraire sujet à des accélérations et des ralentissements ?

L'évolution de ces propriétés biomécaniques musculaires est-elle semblable ou non chez les garçons et les filles ?

La cinétique du développement de ces différents paramètres peut-elle permettre de justifier les choix d'exercices physiques à proposer à ces populations ?

CHAPITRE I

TECHNIQUES ET PROTOCOLES

A - TECHNIQUES	39
1. GRANDEURS MESUREES	39
2. VARIABLES MESUREES	40
a - Dispositif expérimental	40
b - Angle	43
c - Vitesse angulaire	43
d - Couple isométrique	44
e - Accélération angulaire	44
f - Couple dynamique	44
g - Electromyographie de surface	44
h - Techniques d'enregistrement	48
3. VARIABLES CALCULEES	50
a - Longueur du fléchisseur équivalent	50
b - Vitesse de raccourcissement du fléchisseur équivalent	50
c - Force du fléchisseur équivalent	51
d - Compliance-série du fléchisseur équivalent	51
4. DETERMINATION DE L'AGE OSSEUX	51
B - PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX	52
1. PROTOCOLE DE SELECTION	52
2. PROTOCOLES DE MESURES	55
a - Mesures inertielles	56
b - Mesure de la compliance série	56
c - Mesure de la relation force-vitesse	57
d - Mesure de la relation couple-angle	58

L'expérimentation nécessite la mesure et le calcul de différentes grandeurs. Certaines grandeurs sont mesurées et utilisées en tant que constantes biométriques. D'autres grandeurs sont mesurées en tant que variables telles que variables cinématiques, mécaniques, électromyographiques. Enfin, certaines grandeurs et variables sont calculées à partir des données précédentes.

Toutes ces données ont toujours été enregistrées dans le même ordre et dans les mêmes conditions expérimentales.

A - TECHNIQUES

1) GRANDEURS MESUREES

a - Masse corporelle (M en kilogrammes)

A l'aide d'une balance médicale (Précision $\pm$ 50 grammes), chaque sujet subit une pesée simple pieds nus et en slip.

b - Taille debout (T en mètres)

A l'aide d'une toise (trousse ZIEBER-HEGNER), chaque sujet est mesuré debout, pieds nus (Précision de la toise 0,5 millimètre).

c - Longueur de l'avant-bras (d en mètres)

On mesure l'avant-bras du membre supérieur droit de chaque sujet à l'aide de la trousse ZIEBER-HEGNER, sur une surface horizontale, main en position de semi-pronation à plat, avant-bras en extension sur le bras.

La mesure est opérée du bord externe de l'épicondyle de l'humérus à l'apophyse styloïde radiale, par palpation transcutanée.

De plus, on mesure la longueur de l'ensemble avant-bras plus main (d' en mètres) du bord externe de l'épicondyle de l'humérus à l'extrémité du majeur.

d - Périmètre du bras (p en mètres)

A l'aide d'un mètre ruban, on mesure le périmètre du bras droit à mi-distance entre l'axe de rotation du coude et le point acromial, sujet en position debout, bras le long du corps.

e - Moment d'inertie de "l'avant-bras plus main" (I_{MAB} en $m^2 \cdot kg$)

On mesure le moment d'inertie de "l'avant-bras plus main" du membre supérieur droit. La méthode d'oscillation (Précision $10^{-4} m^2 \cdot kg$) sous contrôle électromyographique de surface des fléchisseurs et des extenseurs du coude est utilisée. Cette technique est décrite par GERBEAUX (1981).

2) VARIABLES MESUREES

Une fixation stricte des postures est nécessaire pour obtenir une bonne reproductibilité des mouvements, d'où des réglages nombreux du dispositif expérimental permettant d'adapter celui-ci aux différents sujets des différents âges.

a - Dispositif expérimental (Fig. 17 et 18)

Le dispositif expérimental a été décrit par PERTUZON (1972). Ce dispositif (Fig. 17) est constitué d'un bâti fixé au sol. A ce bâti est annexé un ensemble mobile permettant la reproduction du mouvement (Fig. 17 n° 1 et Fig. 18).

Le sujet est assis sur le siège (Fig. 17 n° 2). Ce siège est réglable selon la taille du sujet. Une sangle (Fig. 17 n° 3) plaque le

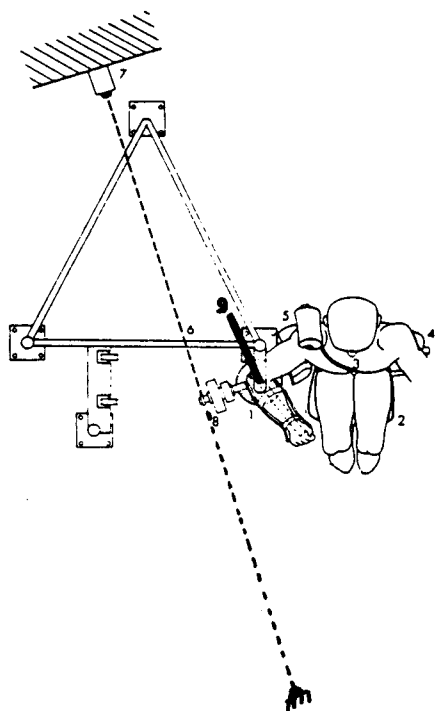


Fig. 17

*Le dispositif expérimental
Vue de dessus
(Légende dans le texte)*

(d'après PERTUZON, 1972)

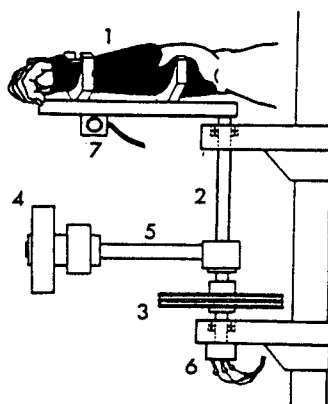


Fig. 18

*L'équipement mobile
Vue de profil
(Légende dans le texte)*

(d'après PERTUZON, 1972)

le sujet au dossier, un appui latéral (*Fig. 17 n° 5*) maintient la position stable.

L'ensemble mobile est constitué d'une attelle (*Fig. 18 n° 1*) dans laquelle l'avant-bras droit est fixé. Nous avons dû construire des attelles sur mesure pour chaque tranche d'âge. La main est maintenue en semi-pronation. Cette attelle est portée par une tige rigide mobile autour d'un axe de rotation (*Fig. 18 n° 2*) qui coïncide avec l'axe du coude. La flexion du coude se fait dans le plan horizontal.

Solidaires de l'axe de rotation, sont fixées une poulie graduée (*Fig. 18 n° 3*) et une barre perpendiculaire à cet axe (*Fig. 18 n° 5*). Sur cette dernière sont assujettis des éléments qui diffèrent selon l'expérimentation.

α) Pour les contractions anisométriques

Ce sont des masses additionnelles (*Fig. 18 n° 4*) qui sont fixées à l'extrémité de cette barre. Les valeurs inertielles de ces masses sont respectivement de :

$$\begin{array}{ll} I_0 = 0 & I_1 = 0.1268 \text{ m}^2 \text{ kg} \\ I_2 = 0.2295 \text{ m}^2 \text{ kg} & I_3 = 0.3313 \text{ m}^2 \text{ kg} \\ I_5 = 0.5349 \text{ m}^2 \text{ kg} & I_{10} = 1.0427 \text{ m}^2 \text{ kg} \end{array}$$

β) Pour les mouvements maximaux anisométriques

Une butée constituée d'un amortisseur est placée en fin de course. Cette butée est importante. Elle permet de supprimer ou de minimiser l'appréhension du sujet pour lui permettre de poursuivre son mouvement jusqu'au bout : de plus, elle permet de protéger l'articulation du coude.

γ) Pour les contractions isométriques

L'axe de rotation (Fig. 18 n° 2) porte un levier métallique (Fig. 18 n° 5) dont l'extrémité, située à 0,3 mètre de l'axe de rotation peut recevoir l'entrefer d'un électroaimant (Poids 0.320 g). Aligné sur le même axe, une barre d'acier fixe supporte l'électroaimant (Fig. 17 n° 9). On peut ainsi, soit rendre solidaire le levier de l'électroaimant, soit rompre la liaison entre l'électroaimant et l'entrefer afin de déclencher un mouvement de quick-release en flexion pendant l'effort isométrique des fléchisseurs du coude. La barre, support de l'électroaimant, est pourvue de quatre jauges de contrainte permettant de mesurer les couples isométriques de flexion.

δ) Pour les mouvements d'oscillation

L'extrémité du levier de l'entrefer peut être reliée à deux supports fixes par l'intermédiaire de deux ressorts opposés (Fig. 17 n° 6). L'ensemble du dispositif mécanique et des ressorts (plus éventuellement le segment corporel) constitue un pendule de torsion dont on peut mesurer, avec un capteur accélérométrique, la période d'oscillation.

b - Angle (θ en degrés ou en radians)

L'angle du coude est mesuré à partir de la position d'extension complète de l'articulation au moyen d'un goniomètre potentiométrique aligné sur l'axe de rotation vertical du système mécanique. C'est un potentiomètre MCB-Veritable ALTER, type H 33, linéaire, de résistance nominale de 1 000 ohms et dont le coefficient de linéarité est de 0,25 %, le bruit de fond de 1 %. Le couple de friction du potentiomètre est de 2×10^{-3} m.N. Le capteur goniométrique est étalonné par rapport à des angles connus et repérés sur la poulie horizontale du dispositif.

c - Vitesse angulaire (θ' en radians par seconde)

Elle est calculée numériquement à partir des valeurs de la

position angulaire, échantillonnées toutes les huit millisecondes, à l'aide d'un miniordinateur (PDP 11).

d - Couple isométrique (C en Newton-mètre)

Il est défini par le produit de la force mesurée sur la barre de l'électroaimant et le rayon d'application de cette force (0.3 m). Le couple est étalonné par application de couples connus sur l'axe de rotation du levier.

e - Accélération angulaire (θ'' en $\text{rad} \times \text{s}^{-2}$)

L'accélération angulaire est calculée à partir d'un accéléromètre tangentiel monoaxial ACB à variation de mutuelle inductance disposé à un rayon de 0.2 m de l'axe de rotation ; cet accéléromètre est étalonné à partir de l'accélération de la pesanteur ($\mp 1 \text{ g}$).

f - Couple dynamique (C en N.m)

Le couple dynamique est calculé par le produit de l'accélération angulaire et du moment d'inertie de l'ensemble mobile $C = \theta'' I$. Comme pour la vitesse angulaire, le calcul est effectué numériquement à partir d'un échantillonnage de l'accélération toutes les huit millisecondes.

g - Electromyographie de surface (EMG) et quantification des des électromyogrammes (EMG_i)

α) 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'antagoniste ;
- le biceps brachii en tant que fléchisseur équivalent courte portion ;
- 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.

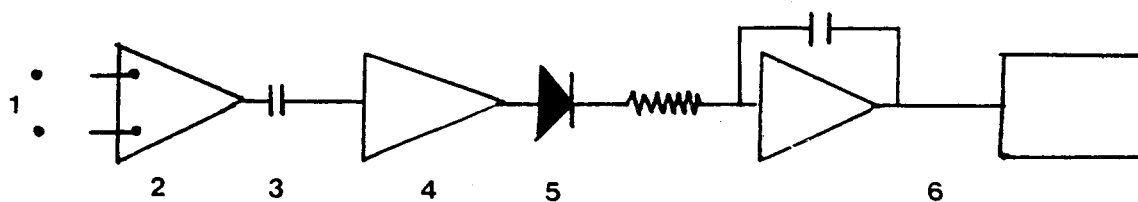
Pour un même muscle et pour obtenir l'activité électrique maximale, les électrodes sont distantes de 3 cm environ et en dérivation longitudinale (VIGREUX, 1977).

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 3 000 Ω .

La localisation des électrodes étant (Fig. 19) :

- . au milieu de la longue portion du triceps qui est toujours active (TRAVILL, 1962) ;
- . au niveau du point moteur de la courte portion (CP) du biceps ;
- . au niveau du point moteur 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.



Système d'enregistrement EMG

Les signaux recueillis par les électrodes (1) sont dirigés vers l'entrée d'un préamplificateur (2) dont l'impédance d'entrée est très importante. 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.

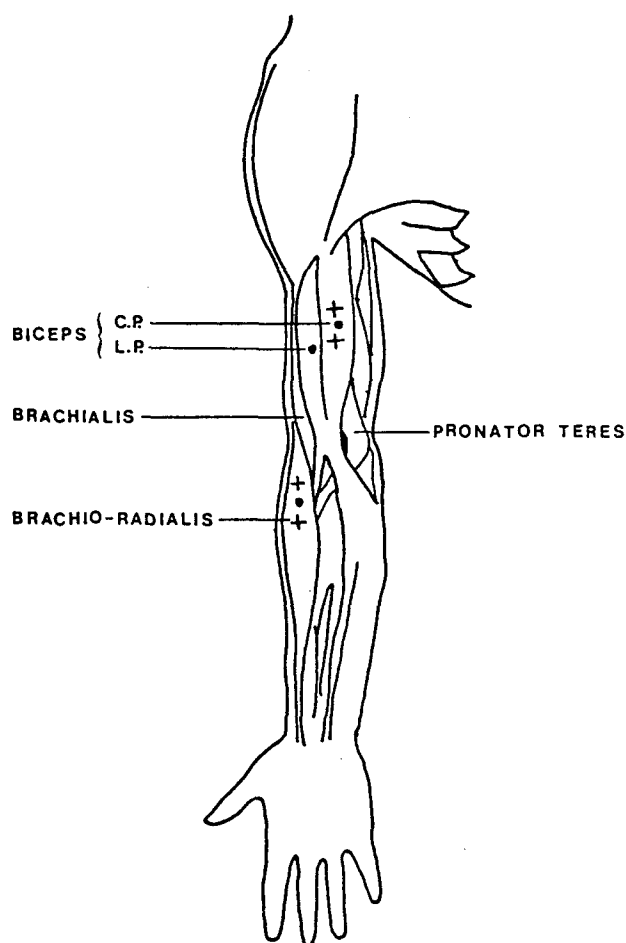


Fig. 19 - Fléchisseurs de l'avant-bras sur le bras
(VON LANTZ et WACHSMUTH, 1959)

- . points moteurs
- + emplacement des électrodes

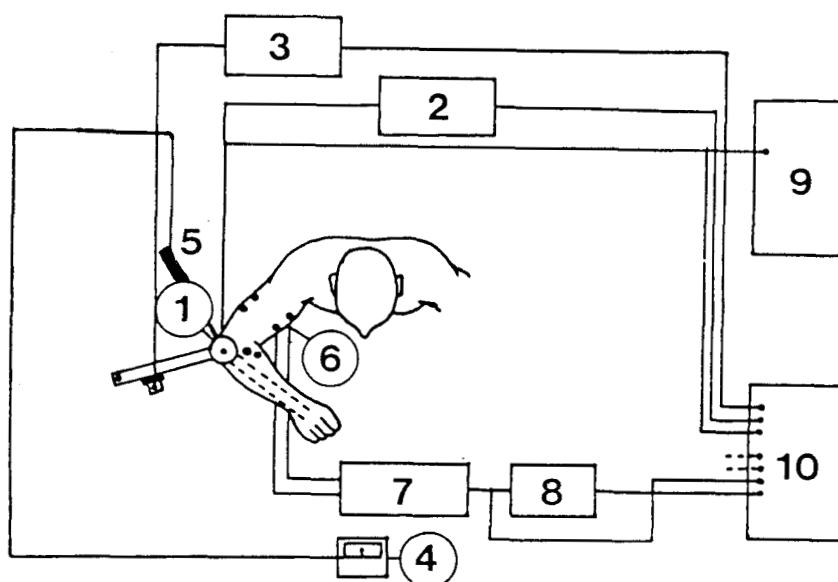


Fig. 20

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 - Galvanomètre de contrôle de la force isométrique
- 5 - Jauges de contrainte
- 6 - Electrodes d'enregistrement des EMG
- 7 - Amplificateur des signaux électromyographiques
- 8 - Intégration d'EMG
- 9 - Oscilloscope pour contrôle du mouvement
- 10 - Enregistreur graphique

B) 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).

h - 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 (100 μ 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 mm x sec⁻¹ pour les mouvements dynamiques de notre expérimentation et 25 mm x sec⁻¹ pour les mouvements d'oscillation et les contractions isométriques.

Le schéma général des dispositifs de mesure est donné dans la figure 20.

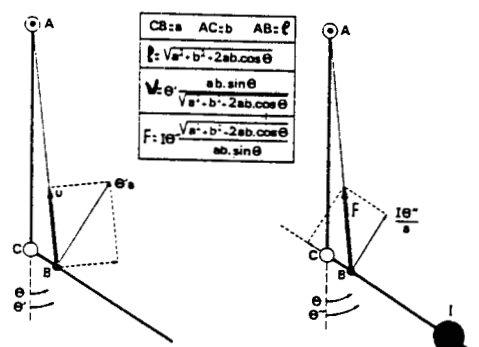


Fig. 21

Calcul des dimensions du fléchisseur équivalent dans la contraction anisométrique.

(Légende dans le texte)

(d'après PERTUZON, 1972)

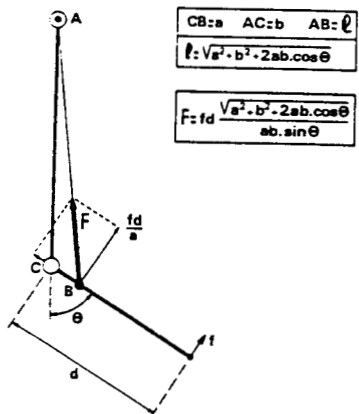


Fig. 22

Calcul des dimensions du fléchisseur équivalent dans la contraction isométrique.

(Légende dans le texte)

(d'après PERTUZON, 1972)

3) VARIABLES CALCULEES (Fig. 21 et 22)

Les variables cinématiques et mécaniques du mouvement de flexion sont transformées en variables cinématiques et mécaniques du biceps brachii, du groupe des fléchisseurs du coude, dit fléchisseur équivalent.

Toutes ces valeurs sont calculées numériquement à partir des échantillonnages de l'angle (θ), de l'accélération angulaire (θ'') et du couple de flexion (C).

a - Longueur du fléchisseur équivalent (l en mètres)

Sa longueur (l) est calculée à partir de la longueur d de l'avant-bras droit (Chapitre I, A, 1 c). $a = 0.18 d$ et représente la distance (mètres) de l'axe épitrochlée-épicondyle de l'humérus au point d'insertion bicipital du biceps sur le radius. $b = 1.17 d$ et représente la distance (mètres) de l'axe épitrochlée-épicondyle de l'humérus à un point moyen de l'épaule situé entre les insertions des deux chefs du biceps sur l'omoplate.

Il est alors facile de calculer la valeur de l à l'angle θ donné :

$$l_{(m)} = \sqrt{a^2 + b^2 + 2 ab \cos \theta} \quad (\text{Fig. 21 et 22})$$

b - Vitesse de raccourcissement du fléchisseur équivalent (V en m.sec⁻¹)

$$V_{m.sec^{-1}} = \theta' \frac{ab \sin \theta}{\sqrt{a^2 + b^2 + 2 ab \cos \theta}} \quad (\text{Fig. 21})$$

c - Force du fléchisseur équivalent (F en newtons)

Elle est calculée à partir du couple statique (c) ou dynamique ($C = I\theta''$) :

$$F = C \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + 2 ab \cos \theta}}{ab \sin \theta} \quad (\text{Fig. 21 et 22})$$

d - Compliance-série du fléchisseur équivalent (K en mètre par newton)

La compliance (K) est mesurée à partir des valeurs de force et de longueur du fléchisseur équivalent, calculées pendant les mouvements de quick-release. On mesure une variation de force ΔF et une variation de longueur Δl . La compliance-série du fléchisseur équivalent est obtenue par la relation :

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

4) DETERMINATION DE L'AGE OSSEUX

a - Clichage radiographique

Les radiographies ont été réalisées en incidence dorso-palmaire. Le sujet est assis et applique la face palmaire du poignet et de la main gauche sur la cassette. L'appareil (UASSIOT PHILIPS) était réglé de la façon suivante :

- . KV : 40 à 50 kV
- . Ampérage : 100 mA
- . Temps de pose : 0.06 à 0.08 secondes
- . Distance foyer/cassette : 85 à 90 cm
- . Film utilisé : Agfa RP2, 18 x 24 cm.

b - Interprétation des clichés

L'âge osseux est interprété selon les indications de "l'Atlas de la maturation squelettique" de SEMPE et PAVIA (1979).

- d) Jeunes : 19 à 22 ans chez les filles
21 à 25 ans chez les garçons.

L'ensemble de ces populations a fait l'objet d'une mesure systématique de la taille et de la masse corporelle. Seuls ont été retenus les individus qui, pour ces critères, étaient situés dans les limites de normalité établies par SEMPE, P. et SEMPE, M. (1971), à savoir taille et masse moyennes $\pm 2\sigma$. La figure 23 donne la situation de chaque sujet retenu pour l'expérience.

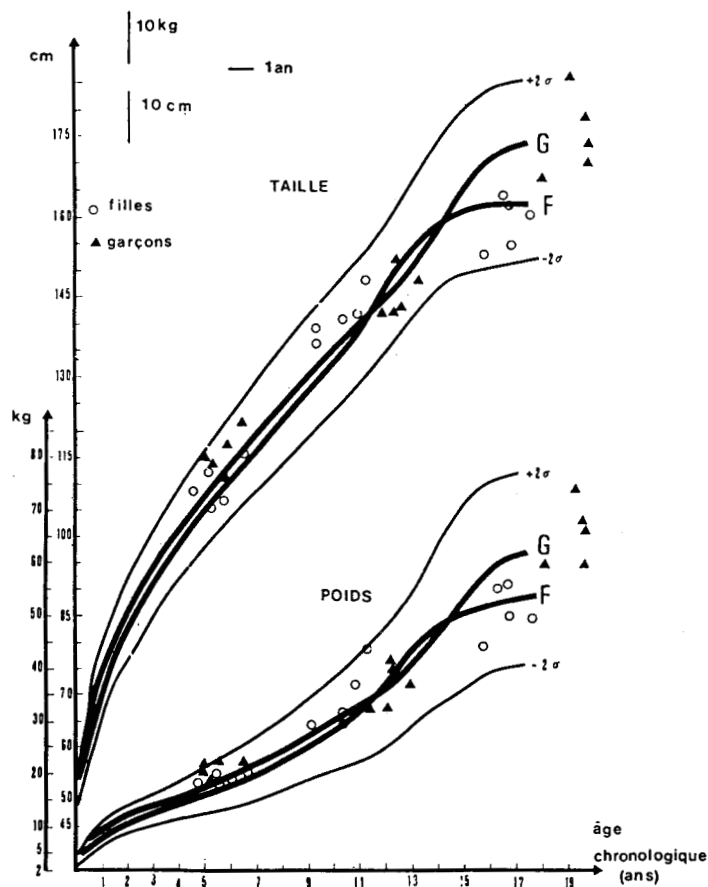


Fig. 23

Taille et poids des sujets choisis

Une dernière étape a consisté à déterminer l'âge osseux et seuls sont définitivement retenus les sujets dont l'âge osseux ne diffère pas de l'âge chronologique de plus de dix-huit mois. La *figure 24* montre la situation de chaque sujet par rapport à la moyenne des populations retenues.

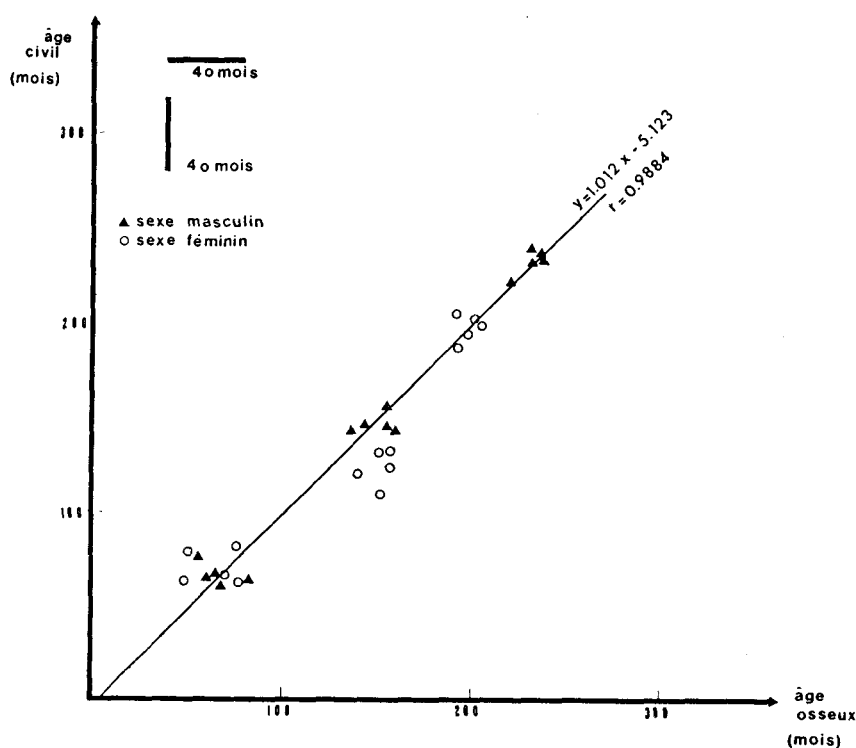


Fig. 24

Droite de corrélation âge osseux-âge civil

Finalement, une population de quarante individus a été répartie en huit échantillons couvrant les deux sexes et les quatre tranches d'âge chronologique. Chaque échantillon comprend cinq individus. Précisons que les postpubères et jeunes de sexe féminin retenus ont vécu le protocole expérimental dans le créneau de leur cycle menstruel excluant la période des règles, plus trois jours avant et trois jours après.

2) PROTOCOLES DE MESURES

Chacun des quarante individus a alors été soumis au même protocole expérimental. Le déroulement général était le suivant :

- Mesure du moment d'inertie de l'avant-bras et de l'appareillage mobile par la méthode d'oscillation ;
- Mesure de la compliance-série du fléchisseur équivalent ;
- Mesure de la relation force-vitesse du fléchisseur équivalent ;
- Mesure de la relation couple-angle du fléchisseur équivalent.

L'ensemble de l'expérience dure une heure trente. Elle nécessite deux expérimentateurs.

A son arrivée, le sujet est installé dans le siège dont les réglages sont assurés dans les trois directions. La sangle est ajustée. Le bras est fixé dans l'attelle au préalable réglée pour que l'axe de rotation du coude corresponde à l'axe de rotation (*Fig. 18 n° 2*) de l'appareillage. Le sujet met son bras droit en extension, ce qui permet de régler la poulie graduée (*Fig. 18 n° 3*) sur le zéro angulaire. Puis, le sujet est libéré.

Pendant que l'un des expérimentateurs pose les électrodes, l'autre fait la calibration inertielle de l'appareillage et des différentes chaînes de mesure concernant l'angle, le couple, les E.M.G. L'accélération est calibrée en cours de manipulation en fonction des amplifications nécessaires.

Pendant la pose des électrodes, le sujet est mis en confiance selon un scénario à peu près semblable en fonction des âges. Puis il est

réinstallé dans le siège. Les différents branchements sont vérifiés.

a - Mesures inertielles

L'avant-bras du sujet est placé à 75° (position d'équilibre) dans l'attelle. De chaque côté du levier de l'entrefer, on fixe deux ressorts qui vont permettre les mouvements d'oscillation de l'avant-bras. L'oscillation passive est déclenchée par une légère traction de l'un des expérimentateurs. Chaque inertie utilisée, I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , I_5 , donne lieu à trois mouvements donc trois enregistrements. L'autre expérimentateur maîtrise l'appareil enregistreur (défilement $25 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$) et contrôle le silence des EMG.

Consignes au sujet : Vous avez trois essais d'entraînement. Vous n'avez rien à faire. Essayez d'être bien décontracté !

b - Mesure de la compliance-série (K) du fléchisseur équivalent (F.E.)

L'électro-aimant est mis en marche. L'entrefer est fixé sur la barre (*Fig. 18 n° 5*) et adapté à l'électro-aimant. Le bras du sujet est réglé à 75° et solidarisé à l'axe de rotation (*Fig. 18 n° 2*).

Nous enregistrons sur l'oscilloscope une première contraction isométrique maximale du sujet. Par réglage de l'oscilloscope, nous faisons en sorte que chaque carré vertical de l'écran (amplitude) corresponde à un huitième de cette force maximale. Chaque huitième additionné aux précédents fera l'objet de trois mouvements identiques de quick-release (*PERTUZON, 1972*). Ne seront retenus que les enregistrements où figure le réflexe d'unloading (*ANGEL et al, 1965*).

Il s'agit pour le sujet, par une contraction isométrique volontaire du F.E., d'atteindre la marque visualisée sur l'oscilloscope. Quand la marque est atteinte et l'effort stabilisé, l'effet de l'électro-aimant sur l'entrefer est coupé par l'un des manipulateurs sans prévenir le sujet ;

l'avant-bras libéré fléchit sur le bras alors que le papier enregistreur défile à 250 par seconde.

Il y a donc 24 mouvements et une minute trente secondes de repos entre chaque mouvement. Le sujet a droit à trois essais au départ.

Consignes au sujet : Vous atteignez doucement l'objectif défini sur l'oscilloscope puis vous attendez et vous laissez faire. Laissez votre avant-bras fléchir sans le retenir.

c - Mesure de la relation force-vitesse (F.V.)

L'oscilloscope est branché sur le goniomètre potentiométrique. L'angle de 30° de l'avant-bras sur le bras est réglé au milieu de l'écran de l'oscilloscope. Ce point de repère sera utilisé par le sujet pendant toute l'expérience comme point de départ du mouvement (F.V.).

On installe sur la trajectoire de la barre (*Fig. 18 n° 5*) un butoir souple (genre amortisseur de voiture). Ce butoir arrêtera l'avant-bras à l'angle de 120° sur le bras. La plage angulaire de déplacement de l'avant-bras sera donc de 90° . Sur la barre rigide (*Fig. 18 n° 5*) solidaire de l'axe de rotation (*Fig. 18 n° 2*) seront fixées certaines charges additionnelles, en fonction des catégories d'âges :

- Jeunes : $I_0, I_1, I_3, I_5, I_{10}$
- Postpubères : $I_0, I_1, I_3, I_5, I_{10}$
- Prépubères : I_0, I_1, I_3, I_5
- Enfants : I_0, I_1, I_2, I_3

Avec chaque charge, le sujet réalisera trois mouvements alors que le papier enregistreur défilera à $250 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$. Nous ne retiendrons pour mesure qu'un mouvement par charge : celui dont l'amplitude et l'intégration de l'EMG sont constantes et maximales.

Le sujet doit à partir de 30° (repère oscilloscope) envoyer les charges additionnelles frapper le butoir (120°), le plus vite et le plus fort possible, donc en contraction anisométrique maximale.

Le sujet a trois essais au départ pour se familiariser avec le butoir. Il se repose une minute entre chaque essai.

Consignes au sujet : Se placer sur le repère de l'oscilloscope (30°). Au signal "top", aller frapper le plus vite et le plus fort possible le butoir avec les masses additionnelles, appuyer ensuite sur les masses quelque temps. Cette dernière consigne permet d'éviter que le sujet ne se relâche avant la butée, comportement réflexe parfois très lisible sur les EMG.

d - Mesure de la relation couple-angle

L'entrefer est ajusté à l'électro-aimant. Le sujet doit produire une contraction isométrique volontaire maximale en plateau, dans un angle donné, pendant deux à trois secondes. L'oscilloscope est connecté sur le couple pour permettre au sujet de visualiser ses efforts.

Les angles explorés sont 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 105° et 120° . La validité de l'enregistrement est jugée par rapport à l'amplitude de l'EMG, la constance de l'intégration et la régularité du plateau de l'enregistrement du couple.

Le sujet a droit à un essai au départ. Le mouvement est exécuté une fois à chaque angle choisi avec deux minutes (MONOD et SCHERRER, 1965) de repos entre chaque effort de flexion.

Consignes au sujet : Faites un effort maximal rapidement en contrôlant le niveau sur l'oscilloscope. Commencez et arrêtez-vous au signal du manipulateur.

Chaque sujet va donc réaliser au minimum soixante-dix mouvements dont soixante donneront lieu à enregistrement. Pour certains sujets -tous les enfants pratiquement- nous n'avons pas réalisé toutes les répétitions et la sangle n'a pu leur être imposée en permanence.

CHAPITRE II

DEVELOPPEMENT BIOMETRIQUE ET OSSEUX

Les huit types de mesures sont regroupés par catégorie et sexe sous forme de moyennes (*Tableau I*). Le *tableau II* présente les combinaisons de variables dont nous avons étudié les corrélations. Les *tableaux III et IV* donnent, par sexe, la valeur des coefficients des fonctions choisies pour les relations, le coefficient de corrélation (r) de ces relations.

1) Ces populations ont été choisies par rapport aux résultats des mesures de taille et de masse de SEMPE¹ (1971).

Les huit mesures différentes sont corrélées deux à deux et par sexe. Tous les ensembles de variables (28) sont appréciés sur quatre modèles d'équation ($y = ax + b$; $y = ax^2 + bx + c$; $y = ax^b$; $y = ab^x$). La relation retenue est celle pour laquelle le coefficient r de BRAVAIS-PEARSON est le plus élevé. Au degré de liberté, d.d.L. = 18, r est significatif à $P = 0.01$.

2) Résultats : l'analyse des différentes corrélations montre que la population est relativement homogène. La croissance du muscle s'organisant en liaison étroite avec la croissance des os et des tendons (COMER, 1956), la sélection des sujets, permet d'affirmer que les muscles concernés par l'expérimentation (B.B., T.B. et B.R.) ont sans doute subi un type de croissance relativement semblable au regard des lois de la croissance.

Les *tableaux III et IV*, par le choix des sujets et la précision de la mesure, établissent un code de la "normalité" de l'enfant de 6 à 25 ans. On peut donc utiliser les fonctions de ces tableaux pour identifier, par des mesures simples, des enfants normaux et des enfants anormaux,

à l'erreur près due à r .

Ces résultats permettent aussi de détecter les sujets dont le développement se situe en dehors de la normalité telle que nous l'avons définie. En relation avec les qualités biomécaniques du muscle pendant la croissance, il peut être possible de détecter précocement des sujets dont le développement exceptionnel peut laisser espérer des performances hors du commun.

CATEGORIES SEXES		AGE CIVIL (mois)	AGE OSSEUX (mois)	TAILLE (m)	MASSE (kg) CORPORELLE	LONGUEUR (m) AVANT-BRAS	LONGUEUR (m) AVANT-BRAS + MAIN	INERTIE (m ² kg) AVANT-BRAS	PERIMETRE DU BRAS (m)
ENFANT +O	$\bar{x}$	65.8	72	1.10	18.7	0.1602	0.2678	0.0091	0.166
	σ	10.1	10.1	0.04	1.25	0.009	0.0165	0.0040	0.008
ENFANT Q_3	$\bar{x}$	67	67.6	1.17	20.5	0.1848	0.293	0.0124	0.17
	σ	6.4	9.9	0.05	1.41	0.0089	0.021	0.0047	0.014
PREPUB. +O	$\bar{x}$	121.2	132	1.41	35.9	0.22	0.356	0.0231	0.221
	σ	11.3	7.35	0.04	8.5	0.0153	0.016	0.076	0.030
PREPUB. Q_3	$\bar{x}$	147	148.6	1.46	36.6	0.2272	0.370	0.0279	0.214
	σ	5.3	8.1	0.04	4.34	0.0109	0.019	0.0067	0.026
POSTPUB. +O	$\bar{x}$	196.4	197.8	1.59	50.4	0.234	0.388	0.0442	0.250
	σ	6.8	5.3	0.05	4.88	0.0118	0.026	0.0057	0.010
POSTPUB. Q_3	$\bar{x}$	234.6	234.6	1.76	65.1	0.2698	0.443	0.0522	0.271
	σ	7.3	7.3	0.09	6	0.0174	0.0230	0.0183	0.014
JEUNE +O	$\bar{x}$	244	244	1.59	53.6	0.2446	0.403	0.0402	0.265
	σ	8.9	8.9	0.07	7.02	0.0075	0.019	0.0061	0.017
JEUNE Q_3	$\bar{x}$	276.8	276.8	1.8	73.4	0.2784	0.471	0.0740	0.294
	σ	34.4	34.4	0.07	8.26	0.009	0.02	0.0113	0.018

TABLEAU I - DONNEES ANTHROPOMETRIQUES DES SUJETS
MOYENNE PAR CATEGORIE ET PAR SEXE

1	y = âge chronol. (mois), x = âge osseux (mois)
2	y = âge chronol. (mois), x = taille (m)
3	y = âge chronol. (mois), x = masse corp. (kg)
4	y = âge chronol. (mois), x = long. avt-bras (m)
5	y = âge chronol. (mois), x = tour de bras (m)
6	y = âge chronol. (mois), x = long. avt-bras + main (m)
7	y = âge chronol. (mois), x = I avt-bras + main (m ² kg)
8	y = âge osseux (mois), x = taille (m)
9	y = âge osseux (mois), x = masse corp. (kg)
10	y = âge osseux (mois), x = long. avt-bras + main (m)
11	y = âge osseux (mois), x = long. avt-bras + main (m)
12	y = âge osseux (mois), x = tour de bras (m)
13	y = âge osseux (mois), x = I avt-bras + main (m ² kg)
14	y = taille (m), x = masse corp. (kg)
15	y = taille (m), x = long. avt-bras (m)
16	y = taille (m), x = long. avt-bras + main (m)
17	y = taille (m), x = tour de bras (m)
18	y = taille (m), x = I avt-bras + main (m ² kg)
19	y = masse corp. (kg), x = long. avt-bras (m)
20	y = masse corp. (kg), x = long. avt-bras + main (m)
21	y = masse corp. (kg), x = tour de bras (m)
22	y = masse corp. (kg), x = I avt-bras + main (m ² kg)
23	y = long. avt-bras (m), x = long. avt-bras + main (m)
24	y = long. avt-bras (m), x = tour de bras (m)
25	y = long. avt-bras (m), x = I avt-bras + main (m ² kg)
26	y = long. avt-bras + main (m), x = tour de bras (m)
27	y = long. avt-bras + main (m), x = I avt-bras + main (m ² kg)
28	y = tour de bras (m), x = I avt-bras + main (m ² kg)

TABEAU II - REPERTOIRE DES RELATIONS CALCULEES ENTRE LES DIFFERENTES DONNEES ANTHROPOMETRIQUES (voir Tableau I)

	Fonction	a	b	r pour $P = 0.01$ ddL = 18
1	$y = ax + b$	1.03	- 9.92	0.983
2	$y = ab^x$	4.75	10.73	0.956
3	$y = ax^b$	2.46	1.12	0.951
4	$y = ax^b$	9 778.4	2.74	0.926
5	$y = ax^b$	5 847.47	2.47	0.932
6	$y = ax^b$	2 858.1	2.86	0.936
7	$y = ax^b$	1 617.69	0.65	0.927
8	$y = ax + b$	290.4	- 251.8	0.915
9	$y = ax^b$	3.57	1.03	0.946
10	$y = ax^b$	6 935.4	2.50	0.936
11	$y = ax^b$	2 396.6	2.66	0.939
12	$y = ax + b$	1 610.4	- 207.52	0.887
13	$y = ax^b$	1 303.6	0.58	0.895
14	$y = ax^b$	0.40	0.34	0.978
15	$y = ax + b$	5.80	0.17	0.964
16	$y = ax + b$	3.65	0.13	0.977
17	$y = ax^b$	2.41	0.38	0.815
18	$y = ax + b$	12.7	1.05	0.925
19	$y = ab^x$	2.62	207 409.8	0.966
20	$y = ab^x$	2.5	1 957.6	0.963
21	$y = ax + b$	351.75	- 39.74	0.983
22	$y = ax + b$	944.7	12.07	0.958
23	$y = ax + b$	0.60	0	0.977
24	$y = ax + b$	0.77	0.04	0.935
25	$y = ax^b$	0.47	0.21	0.905
26	$y = ax + b$	1.23	0.07	0.928
27	$y = ax^b$	0.76	0.21	0.912
28	$y = ax + b$	2.58	0.15	0.939

TABLEAU III - RELATIONS CALCULEES ENTRE LES DIFFERENTES DONNEES
ANTHROPOMETRIQUES FEMININES.

	Fonction	a	b	r pour $P = 0.01$ ddL = 18
1	$y = ax + b$	0.97	1.91	0.983
2	$y = ax^b$	44.26	3.02	0.977
3	$y = ax^b$	3.16	1.04	0.971
4	$y = ax^b$	13 965.9	3.11	0.955
5	$y = ax^b$	4 061.58	2.21	0.921
6	$y = ax^b$	2 146.2	2.72	0.971
7	$y = ax^b$	1 442.88	0.66	0.935
8	$y = ax + b$	303.32	- 284.44	0.952
9	$y = ax^b$	3.24	1.03	0.964
10	$y = ax^b$	13 652	3.10	0.948
11	$y = ax^b$	2 212.9	2.78	0.963
12	$y = ax + b$	1 430	- 158.78	0.915
13	$y = ax^b$	1 386.6	0.64	0.928
14	$y = ax + b$	0.14	0.79	0.788
15	$y = ax + b$	6.65	0.05	0.984
16	$y = ax + b$	3.62	0.12	0.982
17	$y = ab^x$	4.43	0.73	0.930
18	$y = ax^b$	2.94	0.20	0.940
19	$y = ax^b$	3 090.4	2.96	0.971
20	$y = ab^x$	2.66	1 167	0.982
21	$y = ax + b$	412.12	- 48.93	0.966
22	$y = ax + b$	772.11	14.44	0.962
23	$y = ax + b$	0.53	0.02	0.984
24	$y = ax + b$	0.69	0.07	0.915
25	$y = ax + b$	1.34	0.18	0.942
26	$y = ax + b$	1.32	0.08	0.939
27	$y = ax + b$	2.48	0.28	0.950
28	$y = ax + b$	1.69	0.16	0.914

TABLEAU IV - RELATIONS CALCULEES ENTRE LES DIFFERENTES DONNEES ANTHROPO-
METRIQUES MASCULINES ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE.

CHAPITRE III

RELATION COMPLIANCE-FORCE DU FLECHISSEUR EQUIVALENT

A - ENREGISTREMENTS	65
1. DEFINITION DE LA COMPLIANCE	65
2. EXPLICATION PHYSIOLOGIQUE DE LA METHODE DE QUICK-RELEASE	65
3. ENREGISTREMENTS ET CALCUL DE K	67
 B - RÉSULTATS	 67
1. PRESENTATION DES RESULTATS	68
a - Résultats en valeurs normalisées	71
b - Résultats en valeurs réelles	71
2. ANALYSE DES RESULTATS	72
 C - DISCUSSION	 73
1. RELATION COMPLIANCE-FORCE	73
2. COMPLIANCE DU FLECHISSEUR EQUIVALENT ET CROISSANCE	74

La relation entre la compliance du F.E. et la force (F) qu'il développe est mesurée à 75°.

A - ENREGISTREMENTS (*Figure 25*)

1) DEFINITION DE LA COMPLIANCE

La compliance se définit comme étant l'inverse de la raideur ou de l'élasticité. Une matière élastique que l'on étire emmagasine de l'énergie qu'elle restitue en se raccourcissant. Un muscle isolé au repos auquel on applique une force (F) se laisse étirer d'une certaine longueur (l). Si on lui applique une force (F'), il s'allonge d'une longueur (l'). L'élasticité de ce muscle se calcule de la façon suivante :

$$\frac{F - F'}{l - l'} = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \text{élasticité ou raideur.}$$

L'inverse de l'élasticité $\frac{\Delta l}{\Delta F}$ s'appelle la compliance. Il s'agit dans ce cas de la mesure de la compliance de la composante élastique parallèle (C.E.P.), suivant le modèle à trois composantes de HILL (1951).

On peut également calculer la compliance du muscle en contraction. Dans ce cas, on mesure la compliance de la composante élastique série (C.E.S.) ou compliance-série (K).

2) EXPLICATION PHYSIOLOGIQUE ET JUSTIFICATION DE LA MESURE DE K PAR LA METHODE DE QUICK-RELEASE

Dans la méthode de quick-release, lorsque le F.E. est contracté à un certain niveau de force isométrique, il s'établit un équilibre de longueur entre la composante contractile (C.C.) et la C.E.S. La force développée s'équilibre avec les forces extérieures (électro-aimant). Lorsque la liaison avec l'électro-aimant est coupée, cet équilibre est rompu. Au niveau musculaire, la C.C. va rester à sa longueur initiale pendant 40 à 50 ms, temps pendant lequel va apparaître le début d'un silence électromyographique des fléchisseurs appelé "unloading" (A sur la *figure 25*).

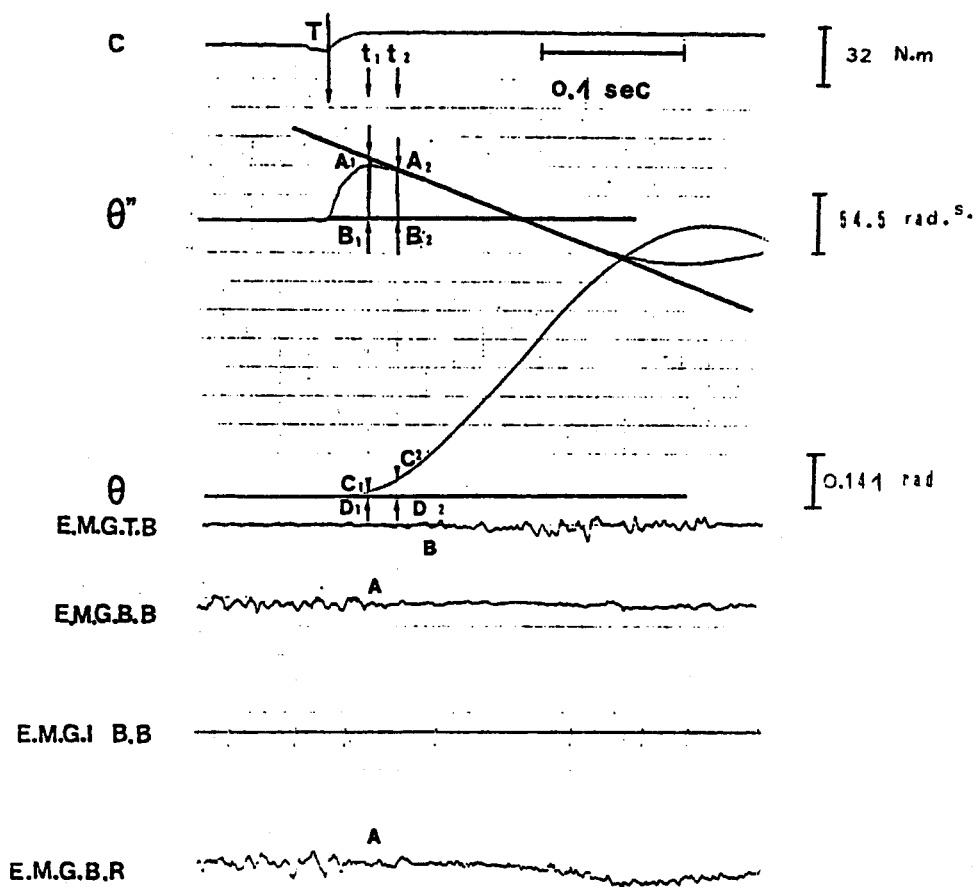


Fig. 25

Exemple d'enregistrement de Q.R.

- A : arrêt du recrutement-unloading
- B : étirement du T.B.
- C : enregistrement du couple
- θ : déplacement
- θ'' : accélération
- EMGI BB : intégration du B.B.
- T : moment où l'effet de l'électro-aimant est supprimé
- $t_1 t_2$: intervalle de temps choisi pour mesurer θ et θ''

Pendant ce temps, la C.C. va servir "d'appui" à la C.E.S. qui va restituer l'énergie emmagasinée et entraîner ainsi une flexion de l'avant-bras sur le bras. Ceci se traduit par des variations de tracés du déplacement (θ) et de l'accélération (θ'') (*Fig. 25*). Pendant l'unloading, le muscle antagoniste (T.B.) présente une bouffée d'activité EMG (B sur la *figure 25*) correspondant à une action freinatrice.

C'est pendant ce court créneau silencieux des agonistes et des antagonistes que nous mesurons Δl et ΔF pour calculer K.

3) ENREGISTREMENTS ET CALCUL DE K

La mesure de C_1 D_1 et C_2 D_2 sur le tracé de θ permet le calcul de l_1 et l_2 (*Fig. 21 et 22*). La mesure des valeurs de A_1 B_1 et A_2 B_2 sur le tracé de θ'' permet le calcul de F_1 et F_2 (*Fig. 21*).

On calcule alors la valeur de K :

$$\frac{l_1 - l_2}{F_1 - F_2} = \frac{\Delta l}{\Delta F} = K \text{ m/N}$$

Les mesures de θ'' sont effectuées en extrapolant le tracé obtenu (*WILKIE, 1956 ; GERBEAUX, 1981*). Cette extrapolation peut être source d'erreur mais, dans notre cas, l'objectif étant de comparer les K d'enfants de différents âges, nous nous sommes attachés à mesurer θ'' dans des conditions toujours semblables.

B - RESULTATS

Les résultats exprimés en mètres par Newton sont présentés sous forme de graphiques en fonction de la force initiale développée (*Fig. 27 et 28*).

1) PRESENTATION DES RESULTATS

Pour chaque sujet la relation K.F. regroupe 15 à 24 points répartis sur une hyperbole et correspondant à huit niveaux de force différents.

Chaque série de résultats peut être présentée en valeurs réelles ou en valeurs normalisées par rapport à L_0 et F_0 . Sur la figure 26, sont regroupées les valeurs normalisées de l'ensemble des points d'une catégorie (4 sujets). Au moyen d'une méthode de moindres carrés, on calcule et on trace la relation $K = \frac{a}{F} + b$, représentative du nuage de points. Les

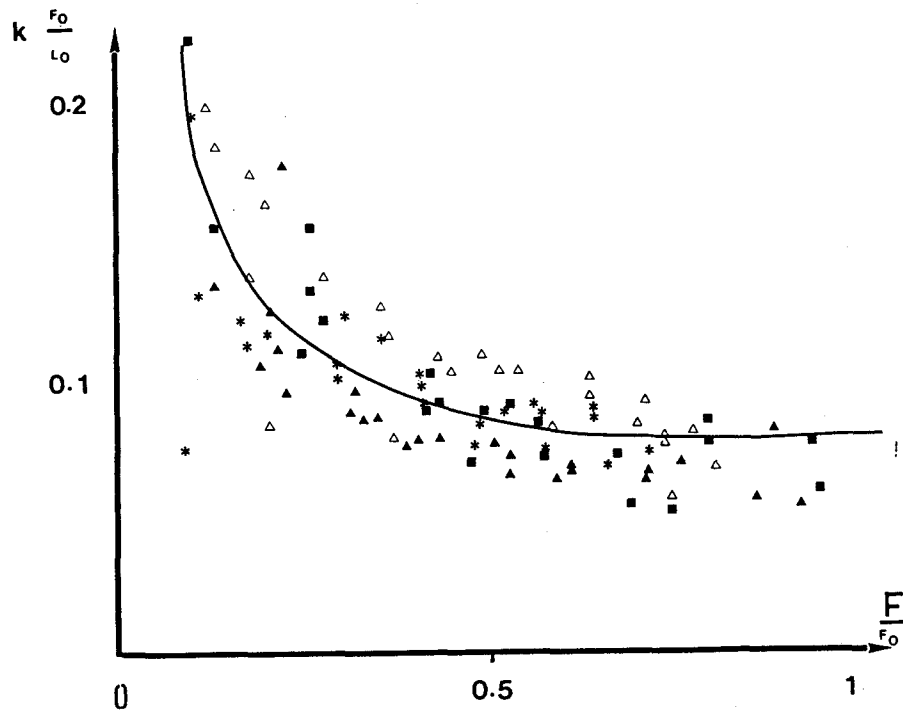


Fig. 26

Relation K.F. normalisée pour une catégorie.

Chaque symbole représente un sujet.

points correspondant à chaque sujet sont représentés par un symbole différent (*Fig. 26*). Il est facile de suivre l'évolution de K en fonction de F pour chaque sujet. Plus F augmente et plus K diminue.

Le regroupement des résultats de ces sujets de la même catégorie (postpubères masculins) donne (*Fig. 26*) un nuage de points important et une dispersion due à la juxtaposition des résultats de chacun.

L'application des équations ainsi calculées (*Tableau V*) permet de tracer sur un même graphique, les relations K.F. des différentes catégories, aussi bien en valeurs normalisées (*Fig. 27*) qu'en valeurs réelles (*Fig. 28*).

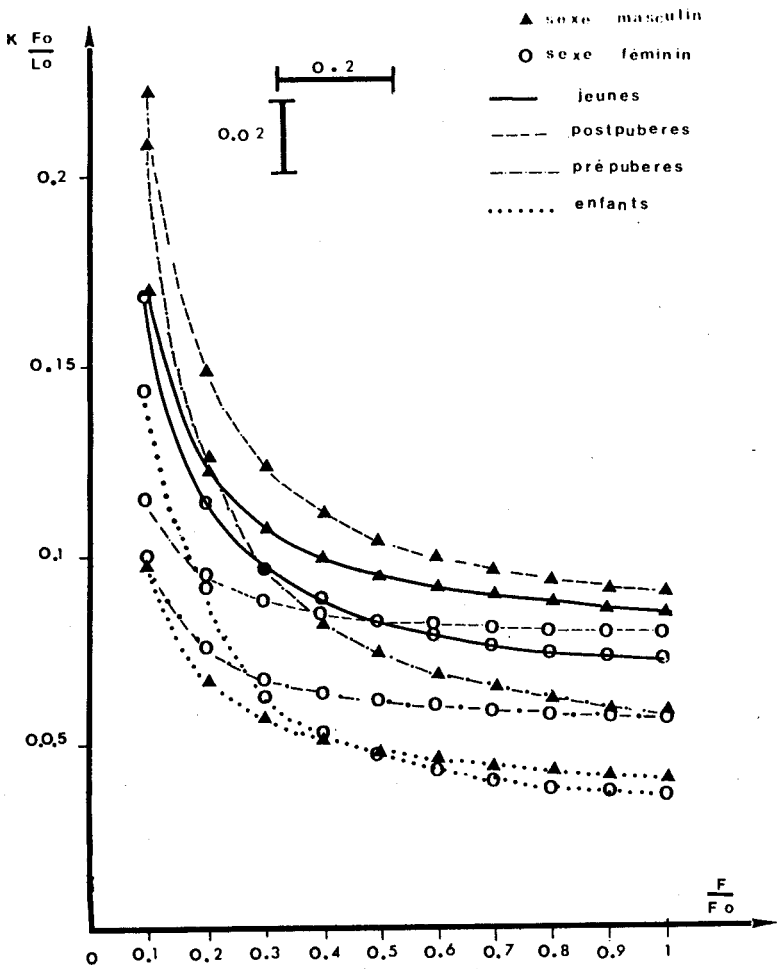


Fig. 27

Relations compliance-force normalisées par catégories et par sexes

Valeurs Catégories	(a) valeur réelle	(b) valeur réelle	(a') valeur normalisée	(b') valeur normalisée
Jeunes	0.00329	0.000015	0.00963	0.0752
Postpubères	0.00428	0.000014	0.01474	0.0752
Prépubères	0.00474	0.000016	0.017	0.04
Enfants	0.00145	0.000022	0.00636	0.0347
Jeunes	0.0033	0.000018	0.01098	0.06
Postpubères	0.00117	0.000021	0.00406	0.0743
Prépubères	0.00132	0.000023	0.00485	0.0507
Enfants	0.00238	0.000015	0.01211	0.0225

TABLEAU V - VALEURS REELLES ET NORMALISEES DES COEFFICIENTS
DE LA FORMULE DE CALCUL DE LA COMPLIANCE SERIE

$a = a' \times l_0$

$b = b' \times \frac{l_0}{F_0}$

En valeurs réelles

$K = \frac{a}{F} + b$

En valeurs normalisées

$K \frac{F_0}{L_0} = \frac{a' L_0}{F} + \frac{b' L_0}{F_0}$

a - Résultats en valeurs normalisées (Figure 27)

La pente de la relation aux intersections des axes est positive. Dans l'ensemble, toutes les catégories masculines ont une valeur de K supérieure à celle des catégories féminines correspondantes, les enfants faisant un peu exception. Les jeunes et les postpubères des deux sexes ont des valeurs de K assez proches.

b - Résultats en valeurs réelles (Figure 28)

Entre 0 et 300 newtons, il apparaît que la décroissance de K est rapide. Au-delà, elle tend à se stabiliser aux environs de $0.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/N}$. Le regroupement des valeurs de K, très proches pour l'ensemble des sujets au-delà de 200 newtons prouve que la caractéristique de K est très peu différente pour toutes les catégories de sujets pendant la croissance.

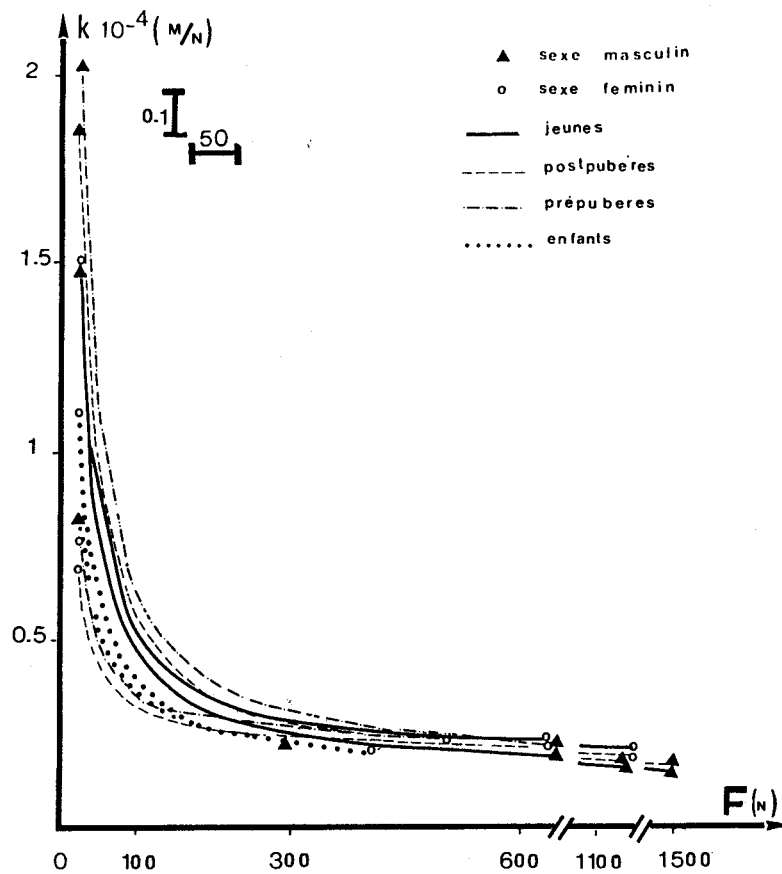


Fig. 28

Relations compliance-force en valeurs réelles
par catégories et par sexes

2) ANALYSE DES RESULTATS

En valeurs normalisées, à une même force normalisée (0.3 de F_0 par exemple) ne correspond pas, dans chaque catégorie, la même valeur de force réelle. Nos interprétations de la relation K.F. normalisée seront donc faites par rapport à des forces relatives à F_0 .

a - Les résultats en valeurs réelles montrent que K se situe entre 2×10^{-4} et 0.2×10^{-4} m/N et que K est une fonction inverse de F.

b - En valeur réelle, la chute de K est très rapide entre 0 et 100 newtons. Ces valeurs de force, peu élevées apparaissent sur les courbes théoriques avec asymptotes. Cependant, ces faibles niveaux de F sont difficiles à tester expérimentalement et engendrent une incertitude au niveau des résultats.

c - La comparaison en valeurs normalisées de K (filles et garçons) montre une valeur relative de K plus importante chez les hommes dans toutes les catégories. Le muscle masculin paraît plus compliant que le muscle féminin.

d - Les enfants ont une K normalisée inférieure à celle des autres catégories. Il est difficile d'établir une hiérarchie parmi les autres catégories, bien que les catégories postpubères et jeunes restent les plus compliantes dans l'ensemble.

Ces remarques nous permettent d'avancer que la K a tendance à augmenter avec l'âge mais, sans doute, dans des proportions très peu importantes au regard des regroupements de valeur que nous montre la *figure 28*.

A propos de l'étude de K sur l'extensor digitarus longus (EDL) et le soleus (Sol) de rats pendant la croissance, *CLOSE (1964)* écrit : "Nos études, indirectement, laissent penser que la compliance relative

des éléments-élastiques-série est à peu près la même pour les EDL et Sol. et change très peu pendant la croissance".

Si certains éléments de nos résultats permettent de discuter la valeur de la compliance normalisée pendant la croissance, en valeur réelle, nous rejoignons les conclusions de *CLOSE (1964)*.

C - DISCUSSION

1) RELATION COMPLIANCE FORCE

La valeur importante de K aux niveaux de force les plus bas peut trouver un début d'explication dans le système de recrutement des unités motrices (U.M.).

Dans la contraction musculaire, selon *BURKE and al (1973)* et *CLAMANN and al (1974)*, les U.M. les plus petites sont recrutées les premières et les plus grandes U.M. sont recrutées les dernières, pour des efforts plus importants ou maximaux.

Dans le protocole expérimental des mouvements de Q.R., la force développée n'est pas constante mais croît de 1/8 de F_0 à 8/8 de F_0 . On peut donc penser que la mesure de la compliance ne concerne pas, à chaque essai, les mêmes U.M. mais des types d'U.M. à chaque fois différents. Ainsi, il est possible de penser qu'à l'intérieur d'un même muscle, les plus petites U.M. soient plus compliantes que les grandes U.M.

De plus, la mesure portant sur un fléchisseur équivalent, la participation relative des différents muscles concernés peut varier avec le niveau de force développé. La lecture des EMG ne montre pas de variation de prédominance (B.B. et B.R.). Tous les essais étant réalisés à 75°, des prédominances peuvent subsister mais restent dans le même rapport pour chaque sujet à chacune des forces développées.

2) COMPLIANCE MUSCULAIRE ET CROISSANCE

La légère augmentation de la compliance-série ou la diminution de la raideur musculaire visible sur la *figure 27*, en fonction de la croissance, peut permettre d'évoquer certaines hypothèses physiologiques.

a - Le nombre de sarcomères augmente avec la croissance en longueur de la fibre musculaire (*TARDIEU and al, 1977*). Cet allongement peut conférer au muscle une plus grande "souplesse". Ceci pourrait expliquer en partie :

- . la compliance-série plus faible chez les enfants
- . la compliance-série plus faible chez les femmes.

b - L'allongement du sarcomère pendant la croissance du rat semble, d'après *GOLDSPINK (1968)*, se produire non pas par allongement des filaments "actine-myosine" mais plutôt par diminution des zones de recouvrement de ces mêmes filaments. Ce phénomène peut conduire à une augmentation de la compliance ou à une diminution de la raideur, dans la mesure où la compliance-série réside en partie dans les ponts d'actine-myosine suivant la théorie d'*HUXLEY (1957)*.

c - Les sarcomères non fonctionnels, définis par *GOLDSPINK (1968)* chez le raton comme des sarcomères qui ne changent pas de longueur pendant une contraction, sont situés aux extrémités polaires du muscle jeune. Ils représentent 40 % du total de sarcomères. Il reste donc 60 % de sarcomères fonctionnels en partie équatoriale. Si l'on accepte à priori que l'enfant de six ans possède encore comme le jeune rat des sarcomères non fonctionnels, la longueur fonctionnelle de muscle se trouve réduite. Elle peut expliquer aussi la relative faiblesse de la compliance-série chez l'enfant.

Ainsi, de la confrontation de nos résultats et de ceux de l'expérimentation animale rapportée dans la littérature, il apparaît que la croissance musculaire se traduit par une augmentation progressive de la compliance-série. Cependant, la croissance allant de pair avec une augmentation de la longueur et de la force du muscle, celui-ci développe quand même ses possibilités de stockage élastique d'énergie mécanique, d'autant plus que le nombre de sarcomères et la proportion de sarcomères fonctionnels augmentent.

CHAPITRE IV

RELATIONS COUPLE-ANGLE ET FORCE-LONGUEUR

A - ENREGISTREMENTS	75
B - RELATIONS COUPLE-ANGLE	75
1. DESCRIPTION DE LA RELATION COUPLE-ANGLE	75
2. ANALYSE DES RESULTATS	78
3. EVOLUTION DU COUPLE ISOMETRIQUE PENDANT LA CROISSANCE	80
C - RELATIONS FORCE-LONGUEUR DU FLÉCHISSEUR ÉQUIVALENT	81
1. BRAS DE LEVIER	81
2. COMPOSANTE ELASTIQUE PARALLELE	85
3. FLECHISSEUR EQUIVALENT	86
D - DISCUSSION	86
1. CONTROLE HORMONAL DE LA CROISSANCE	86
2. NIVEAU DE COUPLE ET DE FORCE	88
<i>a - Croissance osseuse</i>	88
<i>b - Croissance musculaire</i>	88
3. DEPLACEMENT DU MAXIMUM DU COUPLE PENDANT LA CROISSANCE	90
<i>a - Modification de la géométrie musculo-squelettique</i>	90
<i>b - Angle d'équilibre de l'articulation</i>	91
4. EVOLUTION DU COUPLE PENDANT LA CROISSANCE : INTERET PRATIQUE	91

A - ENREGISTREMENTS

La *figure 29* représente l'enregistrement d'une contraction isométrique volontaire maximale.

Le couple est mesuré pendant le "plateau" de force développé, c'est-à-dire pendant la phase isotonique et isométrique de la contraction. Cette phase dure environ deux secondes. Compte tenu des consignes données aux sujets, la vitesse de croissance du couple est plus faible en valeur absolue que dans la phase de relaxation. Durant le plateau, les E.M.G. du B.B. et du B.R. sont d'amplitude constante. De ce fait, l'E.M.G. intégré du B.B. (E.M.G.I.) est constant pendant cette phase. Le T.B. est relativement silencieux. Le couple est mesuré entre A et B (*Fig. 29*).

B - RELATIONS COUPLE-ANGLE

Le *tableau VI* nous donne les résultats de la valeur du couple développé aux angles articulaires choisis, par catégorie et par sexe.

1) DESCRIPTION DE LA RELATION COUPLE-ANGLE (*Figure 30*)

Cette relation est établie aux différents angles de l'articulation, présentés en valeurs croissantes c'est-à-dire à longueur décroissante des muscles fléchisseurs. A chaque valeur de l'angle de l'articulation correspond une valeur du couple de flexion. Pour ne considérer que l'allure générale de la courbe, nous rapportons ici les moyennes calculées sur chaque série de cinq sujets, pour chaque sexe (*Tableau V*). La forme des relations couple-angle (*Fig. 30*) est conforme aux travaux de *FRANKE (1920)*, *PERTUZON (1972)* chez l'Homme et à ceux de *GOLDSPINK (1968)* chez la souris.

L'angle de 30° correspond au couple le plus faible pour tous les sujets. Il est à remarquer que le maximum de chaque relation, des sujets les plus jeunes aux plus âgés, semble se déplacer légèrement vers les angles plus

CATEGORIES	angle C.N.m.	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
	$\bar{x}$							
Jeune masculin	$\bar{x}$	47.5	61.7	71.2	80.2	85	77	74.5
	δ	17	17.7	14.3	17	15,5	14.5	14.5
Jeune féminin	$\bar{x}$	24	32.1	36.5	41.4	48.1	43,4	37.6
	δ	8.9	10.6	10.8	9.1	10.7	8.9	10.4
Postpubère masculin	$\bar{x}$	38.9	49	62.1	76.1	82.9	78.3	67.9
	δ	5.5	6.7	8.5	16.7	20.5	20.5	22.6
Postpubère féminin	$\bar{x}$	22.9	27.4	33	38.9	43.1	43	38.9
	δ	3.2	3.3	6.4	7.9	7.8	9.7	12.5
Prépubère masculin	$\bar{x}$	13.4	18.2	21	25.3	31.3	33.1	28.8
	δ	5.9	9	9.1	8.1	8.7	8.3	10.2
Prépubère féminin	$\bar{x}$	12.8	15.7	18.3	21.9	24.3	25.4	23.1
	δ	4.4	5	3.1	3.5	4.7	5.7	4.5
Enfant masculin	$\bar{x}$	6.1	6.6	8.3	10.8	11.5	11.7	10.3
	δ	3.4	3	3.1	3.7	4.2	5.1	4.9
Enfant féminin	$\bar{x}$	3.1	4.9	6.7	7.8	9.5	8.3	6.9
	δ	1.7	2.2	1.9	2.6	2.8	2	1.8

TABLEAU VI

MOYENNES ET ECARTS-TYPES PAR CATEGORIES DES COUPLES (N.m.) DEVELOPPES AUX
DIFFERENTS ANGLES DE L'ARTICULATION DU COUDE

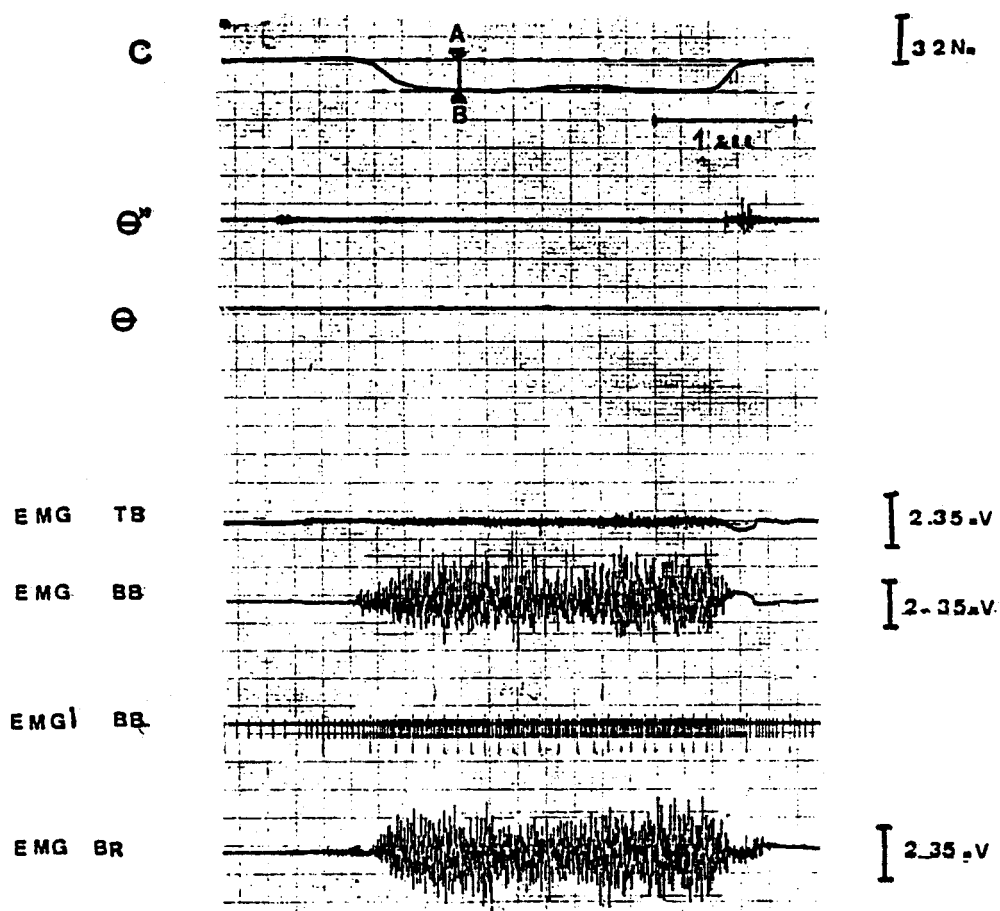


Fig. 29

Une contraction isométrique (Sujet L.E. enfant ♂) à 90°

- C : couple
- θ'' : accélération nulle
- θ : déplacement nul
- T.B. : enregistrement EMG stable faible mais régulier
- B.B. : biceps brachii
- B.R. : brachio-radialis
- A.B. : déviation du couple mesurée

faibles (de 105 à 90°) c'est-à-dire vers des longueurs croissantes du muscle.

2) ANALYSE DES RESULTATS

La comparaison des valeurs de couple obtenues (*Fig. 30*) confirme un certain nombre de points et en révèle d'autres.

a) La hiérarchie entre les âges et le couple (C) est respectée de 6 à 24 ans pour les deux sexes. Le couple développé est en rapport direct avec l'âge des sujets de même sexe.

b) Dans toutes les catégories, les sujets du sexe masculin développent un couple supérieur à celui de la catégorie féminine correspondante. Avant la puberté, les différences de couple sont faibles d'un sexe à l'autre (2 à 3 N.m.). Cette différence s'accroît rapidement pendant la puberté. En fin de puberté, les garçons développent un couple double de celui des filles.

c) Les postpubères et les jeunes de chaque sexe développent au niveau du coude un couple très peu différent (2 à 4 N.m.). La croissance de la force semble ralentie à la fin de la puberté.

d) Pendant la puberté, le couple développé par les garçons au niveau du coude va plus que doubler. Cette constatation a sans doute des conséquences sur le comportement physique et psychologique du garçon pendant cette période pubertaire.

e) On peut remarquer qu'avec l'âge, la différence entre le couple (30°) et le couple maximum s'accroît. La courbe se creuse de plus en plus avec l'âge aux alentours de 90°. Or, l'angle auquel l'articulation du coude est habituellement sollicitée est situé entre 60 et 100°. On peut penser que la fonction remplie journallement par le coude, dans cette plage angulaire, y renforce l'efficacité musculaire. Cette hypothèse est suggérée par les travaux de THEPAUT-MATHIEU (1983). Elle constate en

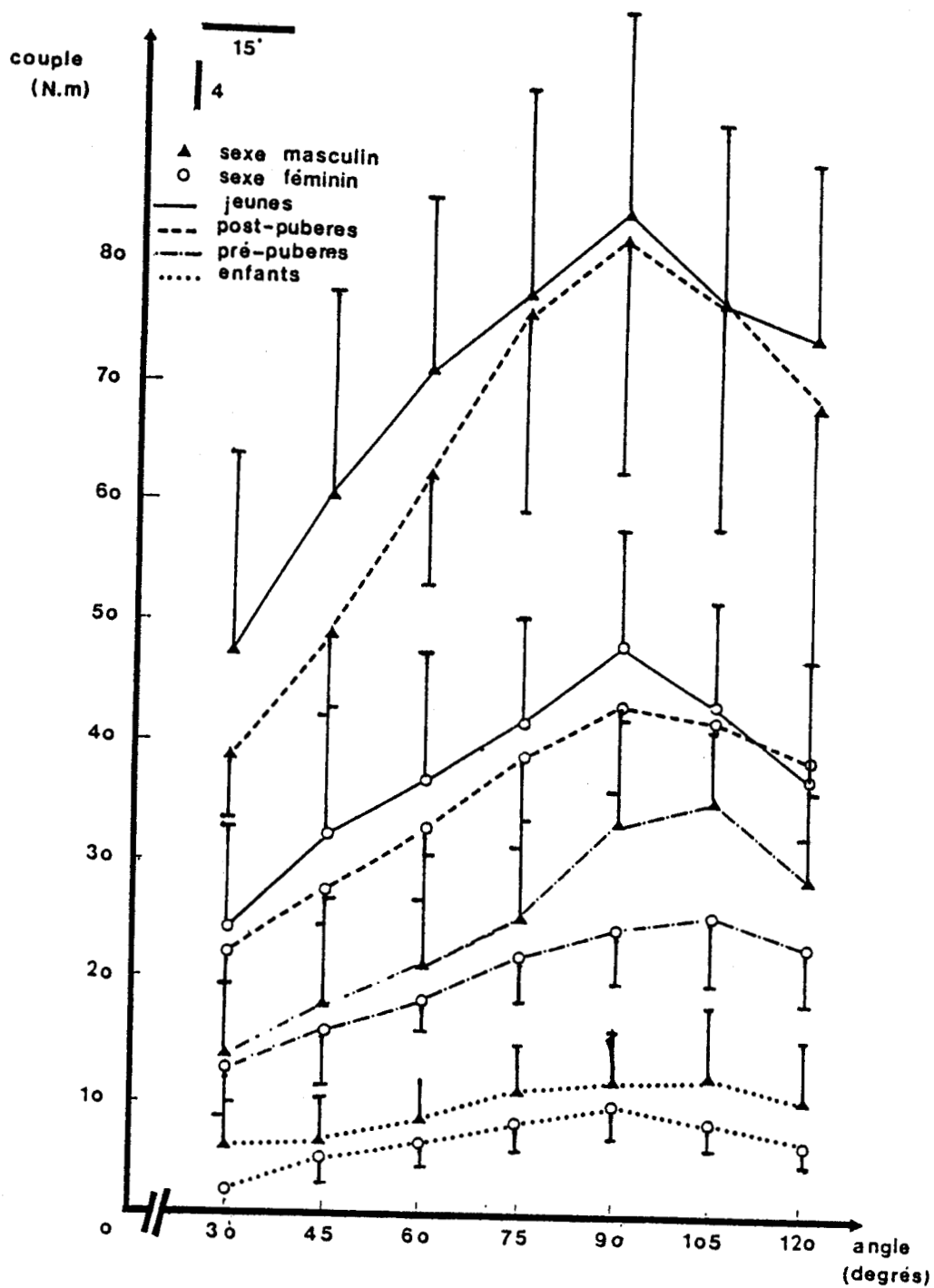


Fig. 30

*Moyenne par catégorie des relations couple-angle
(Valeurs moyennes et écarts-types)*

effet qu'il existe une spécificité angulaire de l'amélioration du couple par l'exercice.

3) EVOLUTION DU COUPLE ISOMETRIQUE PENDANT LA CROISSANCE

En ce qui concerne une modification éventuelle de l'angle d'équilibre de l'articulation avec la croissance et en l'absence de données expérimentales, nous avons systématiquement pris l'angle de 75° comme référence de normalisation des angles articulaires (PERTUZON, 1972). De même Fo a été

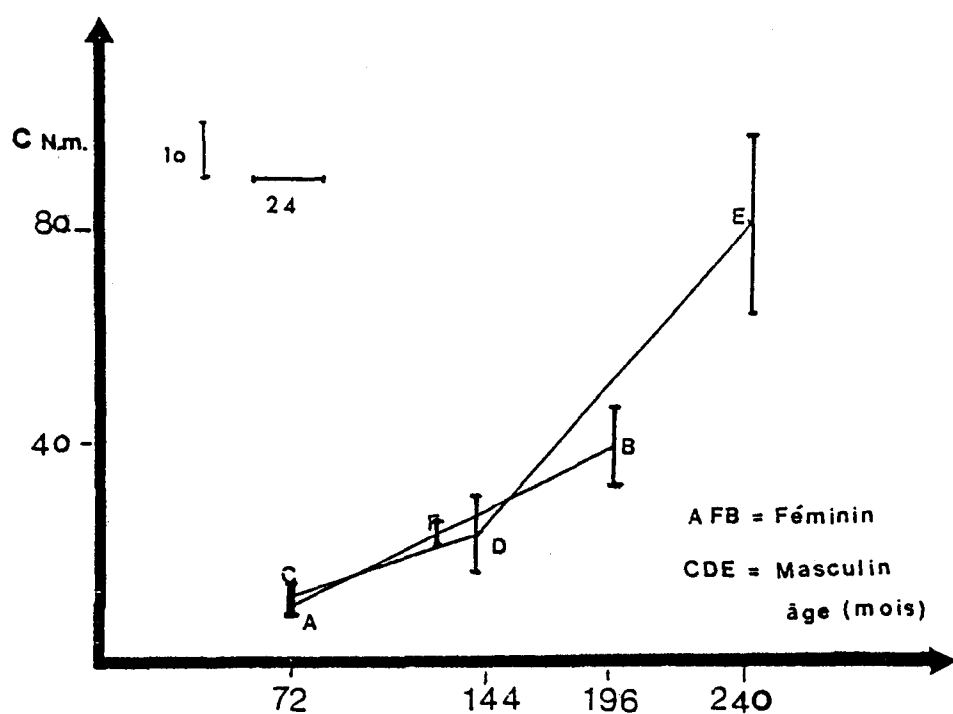


Fig. 31

Evolution du couple pendant la croissance (à 75°)

Pentes : AFB = 0.24 ; CD = 0.18 ; DE = 0.57

(Valeurs moyennes et écarts-types)

choisie pour cet angle de 75° .

Le relevé des couples à 75° , dans chaque catégorie et sexe, nous permet, entre l'enfance et la fin de la puberté, d'établir des normes de progression du couple par sexe (Fig. 31). On remarque que l'évolution du

couple chez les filles de six à seize ans progresse d'une façon régulière, la pente générale de la courbe étant de 0.24 pour x exprimé en mois et y en N.m. Chez les garçons (*Fig. 31*), la progression semble légèrement plus lente de l'enfance à l'étape prépubertaire ; la pente est plus faible que celle des filles, 0,18. Mais, à partir de douze ans, elle augmente fortement (Valeur de pente, 0,57).

Le couple développé aux alentours de douze ans chez les garçons et les filles est à peu près de même valeur.

C - RELATIONS FORCE-LONGUEUR DU FLÉCHISSEUR ÉQUIVALENT

Les relations force-longueur (F.L.) sont calculées à partir des relations couple-angle. Elles sont présentées sous forme de deux tableaux, l'un en valeurs réelles de la force (F) et de la longueur (l) (*Tableau VII*), l'autre en valeurs normalisées (*Tableau VIII*). La *figure 32* présente les relations en valeurs réelles de F et de l tandis que la *figure 33* présente F en valeurs réelles et l en valeurs normalisées. Ces courbes sont de forme sigmoïde.

L'aspect des relations force-longueur diffère de l'aspect des relations couple-angle pour trois raisons principales.

1) BRAS DE LEVIER

Le calcul de la force, à partir du couple, et de la longueur, à partir de l'angle, explique pour une part la différence de forme entre les relations couple-angle et force-longueur. En effet, si au cours des rotations de l'articulation, la longueur du F.E. décroît toujours lorsque l'angle θ croît ; par contre, le rapport entre le couple et la force du F.E. est fortement lié aux modifications du bras de levier du F.E. en fonction de l'angle. On démontre aisément que la valeur maximale du bras de levier est égale à $CB = a$ (*Fig. 21 et 22*). Cette condition est remplie lorsque la direction du

Catégories	ANGLES	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
Enfant féminin	F (N)	245	270	294	296	334	291	236
	σ de F	100	100	46	86	87	62	91
	L (m)	0.2125	0.2084	0.2059	0.1964	0.1893	0.1818	0.1745
Enfant masculin	F (N)	416	310	312	353	350	351	332
	σ de F	100	48	35	92	109	109	96
	L (m)	0.2454	0.2407	0.2345	0.227	0.2187	0.21	0.2016
Prépubère féminin	F (N)	753	636	586	605	620	644	625
	σ de F	310	206	120	104	117	147	106
	L (m)	0.2932	0.2877	0.2802	0.2712	0.2613	0.2509	0.2409
Prépubère masculin	F (N)	764	719	658	688	790	833	776
	σ de F	174	100	65	78	196	195	106
	L (m)	0.2959	0.2902	0.2827	0.2737	0.2636	0.2532	0.2431
Postpubère féminin	F (N)	1238	1029	984	1004	1036	1026	991
	σ de F	204	144	203	202	178	214	200
	L (m)	0.3113	0.3053	0.2973	0.2879	0.2773	0.2664	0.2557
Postpubère masculin	F (N)	2016	1751	1734	1815	1791	1619	1418
	σ de F	278	252	170	394	445	451	606
	L (m)	0.3594	0.3538	0.3462	0.3371	0.3266	0.3154	0.3041
Jeune féminin	F (N)	1236	1147	1038	1021	1103	993	920
	σ de F	453	228	136	84	78	146	227
	L (m)	0.3248	0.3186	0.3104	0.3004	0.2894	0.278	0.2668
Jeune masculin	F (N)	2068	1908	1792	1721	1726	1555	1609
	σ de F	462	592	404	416	355	336	344
	L (m)	0.3693	0.3627	0.3533	0.342	0.3294	0.3163	0.3037

TABLEAU VII

MOYENNES ET ECARTS-TYPES DE LA FORCE, MOYENNE DE LA LONGUEUR
F.E., DANS LA RELATION FORCE-LONGUEUR EN VALEURS REELLES

CATEGORIES	ANGLES	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
Enfant féminin	F/Fo	0.827	0.912	0.993	1	1.128	0.983	0.797
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Enfant masculin	F/Fo	1.178	0.878	0.883	1	0.991	0.994	0.94
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Prépubère féminin	F/Fo	1.244	1.051	0.968	1	1.024	1.064	1.033
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Prépubère masculin	F/Fo	1.11	1.045	0.956	1	1.148	1.21	1.127
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Postpubère féminin	F/Fo	1.233	1.024	0.98	1	1.031	1.021	0.987
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Postpubère masculin	F/Fo	1.11	0.964	0.955	1	0.986	0.892	0.781
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Jeune féminin	F/Fo	1.21	1.123	1.016	1	1.08	0.972	0.901
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88
Jeune masculin	F/Fo	1.201	1.108	1.041	1	1.002	0.903	0.934
	L/Lo	1.08	1.06	1.03	1	0.96	0.92	0.88

TABLEAU VIII

MOYENNES PAR CATEGORIES DES RELATIONS FORCE-LONGUEUR EN
VALEURS NORMALISEES (F/Fo et l/lo)

F.E. sur l'avant-bras est perpendiculaire à la direction de l'avant-bras. Compte tenu des valeurs de a et de b (Fig. 21 et 22), cette condition est remplie pour une valeur de θ située aux environs de 100° . De part et d'autre de cet angle, la valeur du bras de levier est inférieure à " a " et décroît

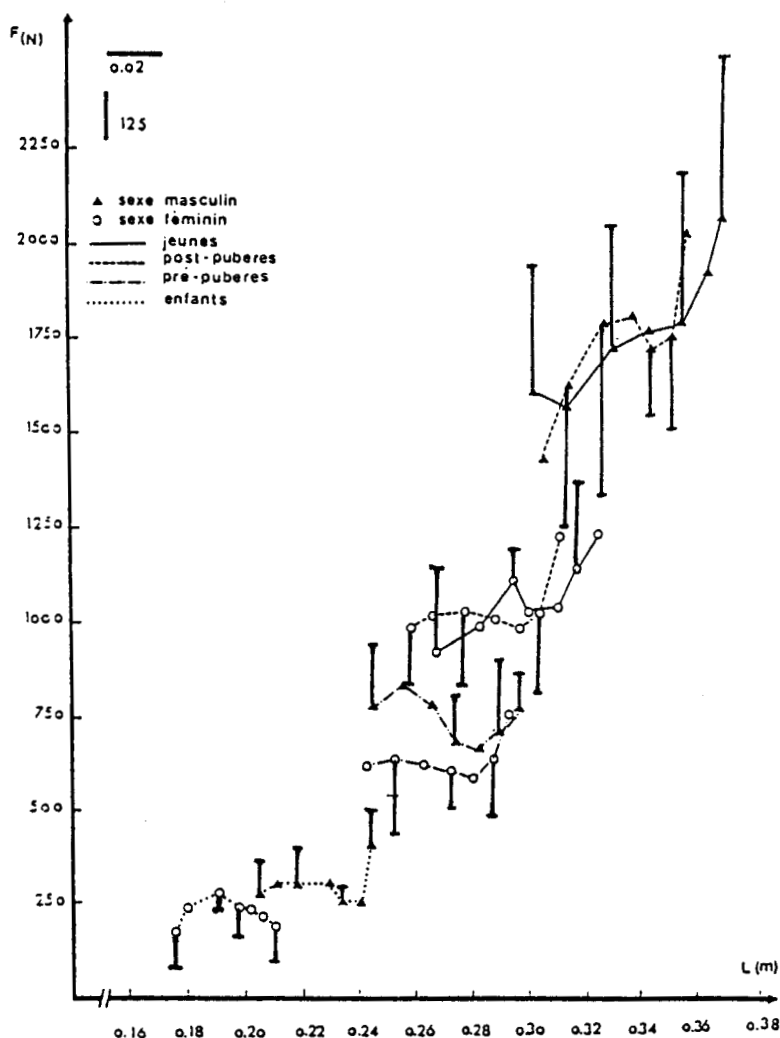


Fig. 32

*Moyenne des relations force-longueur par catégorie et par sexe
 (Valeurs moyennes et écarts-types)*

au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cet angle. Par conséquent, à force constante développée par le F.E., le maximum du couple devrait être observé pour cet angle de 100° . Cette brève analyse de la géométrie musculo-squelettique de l'articulation du coude explique pourquoi la relation couple-angle présente un maximum. Toutefois, il est clair que le maximum dépend également de la force développée par le F.E. et donc de sa longueur.

Cette démonstration explique en partie pourquoi les deux courbes présentent une partie ascendante semblable jusqu'au maximum puis une partie en plateau ou légèrement descendante.

2) COMPOSANTE ELASTIQUE PARALLELE

Au-delà du maximum, la force isométrique du F.E., après avoir marqué un ralentissement ou une légère décroissance, continue à augmenter (Fig. 32 et 33). Cette croissance de F peut s'expliquer par le fait qu'au-

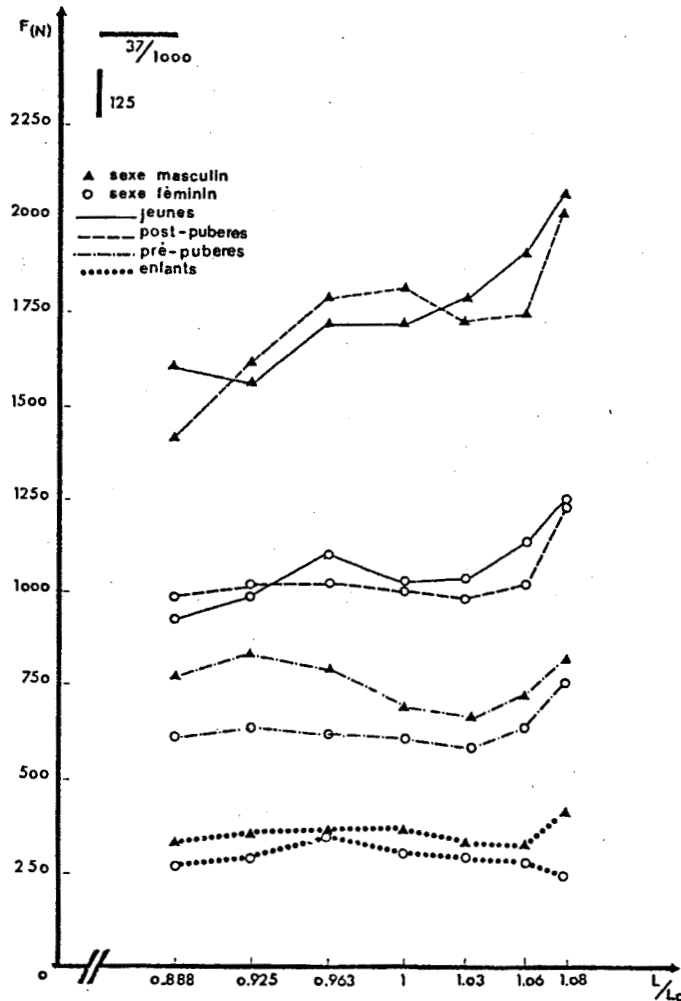


Fig. 33

Moyenne des relations force-longueur normalisée l/l_0 par catégorie et par sexe

delà de l_0 , la longueur l du muscle est plus grande que l_0 . Or, nous savons qu'au-delà de la longueur d'équilibre (l_0), à la force de la

composante contractile du muscle (C.C.), s'ajoute une force passive (*Fig. 14*) généralement attribuée au sarcolemme et aux différentes enveloppes conjonctives, c'est-à-dire à la composante élastique parallèle (*HILL, 1950*).

3) LE FLECHISSEUR EQUIVALENT

Enfin, le fléchisseur équivalent représente l'ensemble des muscles du groupe des fléchisseurs. Ces muscles ne possèdent pas les mêmes caractéristiques de leur géométrie musculo-squelettique. Il est vraisemblable que les relations couple-angle individuelles de ces muscles ne présentent pas un couple maximum pour le même angle de l'articulation du coude.

D - DISCUSSION

1) CONTROLE HORMONAL DE LA CROISSANCE

Plusieurs systèmes hormonaux interviennent à la fois dans le développement du squelette et dans celui du muscle strié squelettique. Le développement du squelette dépend d'au moins deux mécanismes :

- . L'activité des cartilages de conjugaison pour la croissance de l'os en longueur ;
- . La formation et le développement des zones d'ossification du squelette.

L'hormone de croissance (S.T.H.) agit à la fois sur l'activité des cartilages de conjugaison en stimulant la prolifération chondrocytaire et sur la formation des zones d'ossification épiphysaires. Ces actions sont renforcées par les hormones thyroïdiennes (T_3 , T_4) d'après *BOURGEOIS et al. (1981)*.

Les hormones sexuelles et, en particulier, les stéroïdes sexuels testiculaires (testostérone) et surrénaliens (déhydro-épiandrostérone) potentialisent l'action de la S.T.H. et participent de ce fait à l'augmentation staturale, particulièrement au moment de la puberté. Toutefois, un excès en androgènes aboutit, par son action sur l'ossification, à un blocage des

cartilages de conjugaison, associé à une ossification plus rapide. Cet effet très marqué des androgènes sur la maturation osseuse leur confère vraisemblablement un rôle sur la limitation de la croissance osseuse en longueur.

Pour ce qui est des oestrogènes, ceux-ci présentent des effets comparables à ceux des androgènes au niveau des cartilages de conjugaison.

Parallèlement au développement du squelette, ces systèmes hormonaux contrôlent également le développement de la masse musculaire, de par leurs effets sur l'anabolisme et le catabolisme protidique. Il semble que la S.T.H., les hormones thyroïdiennes et les androgènes stimulent l'anabolisme protidique alors que les oestrogènes ont sur cet anabolisme un effet beaucoup moins marqué.

De ce fait, on peut expliquer, au moment de la puberté, un accroissement de la masse musculaire nettement plus important chez les garçons que chez les filles. Ce fait se traduit pas une différence nette dans l'augmentation de la force musculaire (*Fig. 31*).

Ces faits sont évidemment à rapprocher de l'utilisation des androgènes dans la pratique sportive de haut niveau : 80 % des haltérophiles et lanceurs en consomment (*NADEAU et PERONNET, 1980*). Les androgènes sont, dans ce cas, essentiellement utilisés pour accroître la masse musculaire et la force. Il est au moins souhaitable, sans parler des autres dangers, que ces androgènes soient utilisés par des individus dont la croissance staturale est terminée. Même si l'on a cherché à réaliser la synthèse d'androgènes "non virilisants", ces androgènes ont un effet non négligeable sur les caractères sexuels secondaires.

Finalement, la cinétique du développement musculaire que nous avons décrite, sur les populations étudiées, est bien en accord avec les données du développement hormonal. D'ailleurs, les entraîneurs sportifs savent très bien, de par leur expérience en compétition, "qu'un cadet barbu est

souvent plus performant qu'un junior imberbe".

2) NIVEAU DE COUPLE ET DE FORCE

Les relations couple-angle et force-longueur se présentent graphiquement sous des aspects différents mais restent le résultat des mêmes mesures présentées soit au niveau de l'articulation du coude (couple-angle), soit au niveau du F.E. (force-longueur).

Le niveau du couple (C) comme celui de la force (F) est plus élevé chez les garçons que chez les filles. Il augmente pendant la croissance des sujets dans les deux sexes. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène.

a - Croissance osseuse

Le couple comme la force, aux différents angles articulaires, est fonction de la longueur du muscle donc à la longueur de a et de b (*Fig. 21 et 22*) : a et b sont eux-mêmes en rapport avec la longueur d mesurée du bord externe de l'épicondyle à l'extrémité de l'apophyse styloïde du radius, par l'intermédiaire des relations $a = 0,18 d$ et $b = 1,17 d$ (*PERTUZON, 1972*). Or, cette longueur d, pendant la croissance de six à vingt-quatre ans, passe de 0,16 m à 0,244 m chez les filles et de 0,184 m à 0,278 m chez les garçons. Cette augmentation de d d'environ la moitié de la longueur initiale participe grandement à l'amélioration de la performance, pendant la croissance et à la différence qui s'établit entre les garçons et les filles.

b - Croissance musculaire

Les masses musculaires du biceps (F.E.) sont plus importantes chez les garçons que chez les filles et chez les jeunes que chez les enfants, en raison d'une augmentation en longueur et en section.

La longueur du muscle augmente pendant la croissance (*Fig. 32*). Le *tableau I* nous montre que la circonférence du bras augmente également

pendant la croissance. Elle passe en moyenne de 0,166 m à 0,265 m chez les filles et de 0,170 m à 0,294 m chez les garçons. L'augmentation est sensiblement la même que pour la longueur de d et participe à l'augmentation de C et de F .

α) Croissance des fibres musculaires

Nous avons vu dans l'introduction que le muscle, pendant la croissance, augmente en longueur par l'intermédiaire de ses fibres par addition longitudinale de sarcomères et allongement de ceux-ci. La section du muscle augmente aussi pendant la croissance et ceci par augmentation de la section de chaque fibre (jusqu'à quarante fois chez le rat) (GOLDSPINK, 1971) et par augmentation du nombre de fibres dans certaines conditions d'exercice suivant certains auteurs (GONYEA, 1980). Les sarcomères, fonctionnant comme des générateurs de force indépendamment les uns des autres (HUXLEY, 1980), sont sans doute l'un des facteurs essentiels de l'augmentation du couple et de la force du F.E.

β) Propriétés des sarcomères

Le couple et la force dépendent du nombre de sarcomères. La valeur de C et de F en fonction de l'angle dépend aussi des propriétés contractiles liées au degré de recouvrement des myofilaments (actine-myosine) de chacun de ces sarcomères (HUXLEY, 1980). On peut supposer que la capacité de développer des ponts d'actine-myosine augmente avec l'âge.

De plus, supposons qu'il subsiste chez l'enfant de six ans et plus, comme chez le rat, des sarcomères qualifiés de "non fonctionnels" par GOLDSPINK (1971). Ce type de sarcomère ne change pas de longueur. Il ne produit sans doute aucune énergie et ne fait que transmettre les forces à la manière d'un tendon. Sa disparition progressive pendant la croissance et son remplacement par des sarcomères fonctionnels peut expliquer en partie, l'augmentation du couple et de la force.

γ) Augmentation de la C.E.P. avec la croissance

Il est vraisemblable que la masse des sarcolemmes et des enveloppes conjonctives augmente avec le volume musculaire du F.E. On peut penser que ce fait doit conduire, pendant la croissance, à une augmentation des tensions passives développées par la C.E.P. au-delà de 10. Au regard des figures 32 et 33, cette hypothèse paraît acceptable car on constate au-delà de 10 et chez les plus âgés une augmentation plus rapide de la force. Il paraît nécessaire de vérifier cette hypothèse d'autant plus que GOLDSPIK (1971) montre, pendant la croissance du rat, des variations de la relation tension-longueur sans invoquer le rôle joué par la C.E.P. et que TARDIEU *et al* (1974) ne trouve aucune modification de la relation tension-longueur pendant la croissance du rat.

3) DEPLACEMENT DU MAXIMUM DU COUPLE PENDANT LA CROISSANCE

Nous pouvons voir (*Fig. 30*) que le maximum du C semble, des plus jeunes aux plus âgés et pour les deux sexes, se déplacer vers de plus petits angles (de 105 à 90°).

a - Modification de la géométrie musculo-squelettique

Nous avons montré que la géométrie musculo-squelettique était très importante quant aux C développés aux différents angles. Pendant la croissance, les cartilages de conjugaison concernés, situés pour l'un d'entre eux sur CB et pour deux autres sur AB (*Fig. 21*) font varier la valeur de a et de b. Or, la caractéristique de la croissance étant la discontinuité, a et b ne vont pas nécessairement croître à la même vitesse. Le rapport $\frac{a}{b}$ est donc susceptible de varier. L'angle de 100° (θ) que nous avons défini comme étant l'angle au-delà duquel C diminue chez l'adulte peut être différent chez les enfants.

Il semble que cet angle soit plus élevé chez les enfants et diminue pendant la croissance au regard de la figure 30. C'est un point qui devrait faire l'objet d'une étude expérimentale détaillée, par analyse de

clichés radiographiques de l'ensemble du membre supérieur. Nous n'avons pas effectué systématiquement cette étude. Nous nous sommes limités à une étude partielle en comparant la géométrie musculo-squelettique du biceps-brachii chez un adulte et un enfant de dix ans. Il semblerait que le rapport a/d ne reste pas constant durant la croissance mais qu'il tendrait à augmenter légèrement.

b - Angle d'équilibre de l'articulation

PERTUZON (1972) le fixe à 75° pour les adultes. Il n'est pas impossible qu'il puisse être différent chez l'enfant et se modifier avec l'activité pendant la croissance pour tendre vers 75° à l'âge adulte. En fait, l'angle d'équilibre articulaire est défini par l'équilibre des tensions élastiques passives du groupe des fléchisseurs et du groupe des extenseurs.

Trois questions restent posées :

- . Le rapport $\frac{a}{b}$ varie-t-il avec la croissance ?
- . Y-a-t-il avec la croissance un déplacement de l'angle d'équilibre de l'articulation du coude ?
- . Existe-t-il des sarcomères non fonctionnels chez l'enfant et jusqu'à quel âge ?

4) EVOLUTION DU COUPLE EN FONCTION DE LA CROISSANCE : INTERET PRATIQUE

La *figure 31* résume cette évolution pour l'angle de 75° . Les deux relations présentées sur cette figure peuvent constituer une référence de la dynamique de croissance du couple de flexion, chez les filles et chez les garçons. Sur cette base, on peut envisager la possibilité de suivre, surveiller et prévoir l'évolution du couple pendant la croissance. Ces résultats permettent aussi d'envisager d'agir et de transformer ces valeurs et cette pente par le travail, l'entraînement, la rééducation en fonction d'objectifs sportifs et médicaux.

CHAPITRE V

RELATIONS FORCE-VITESSE ET PUISSANCE-VITESSE

A - ENREGISTREMENTS ET CALCULS	92
1. CHOIX DES ENREGISTREMENTS	92
2. CALCUL DE LA FORCE ET DE LA VITESSE INSTANTANEE	94
B - ANALYSE DES RÉSULTATS	96
1. EVOLUTION DE LA FORCE ET DE LA VITESSE EN VALEURS REELLES	97
2. EVOLUTION DE LA VITESSE RELLE (V_{20} et V_{80})	97
3. EVOLUTION DE LA VITESSE NORMALISEE (V_{80} et V_{20})	100
C - DISCUSSION	101
1. LIMITES DE LA "PLAGE UTILE" DANS LES RELATIONS F.V.	102
a - Phase de croissance de la force	103
b - Phase de décroissance de la force	104
c - Problèmes particuliers liés au fléchisseur équivalent	104
2. RELATION FORCE-VITESSE	105
a - V_{80}	105
b - V_{20}	105
D - RELATION PUISSANCE-VITESSE INSTANTANÉE	107
1. RELATION PUISSANCE-VITESSE	107
2. PUISSANCE MAXIMALE	108
3. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION	110
a - Variation de la relation puissance-vitesse pendant la croissance	111
b - Signification de P_{max} et V_{pmax}	111
c - Relation puissance-vitesse et performance	111
d - Evolution de la P_{max} pendant la croissance et entraînement en force et en vitesse	112

Lorsqu'un muscle se contracte au cours d'un mouvement anisométrique volontaire maximal, sa vitesse de raccourcissement (V) croît jusqu'à une valeur maximale qui dépend de l'inertie déplacée (I) et de l'amplitude du mouvement. Corrélativement, la force (F) qu'il développe à chaque instant décroît. Le mouvement étudié, flexion de l'avant-bras droit sur le bras, est un mouvement monoarticulaire, volontaire où la masse équivalente opposée au muscle varie continuellement alors que les études de relations force-vitesse sur le muscle isolé sont caractérisées par l'isotonie de la contraction.

Nous avons examiné, à partir du mouvement anisométrique maximal et volontaire de flexion du coude, la relation entre les valeurs instantanées de force et de vitesse du fléchisseur équivalent dans les différentes classes d'âge.

A - ENREGISTREMENTS ET CALCULS

1) CHOIX DES ENREGISTREMENTS (*Figure 34*)

Nous ne retenons qu'un seul enregistrement par inertie et par sujet. Chaque enregistrement retenu a les caractéristiques suivantes :

- a) Il présente la valeur la plus élevée d'accélération ;
- b) Il présente l'amplitude électromyographique de surface la plus élevée et la plus constante pendant le mouvement ;
- c) Il présente une amplitude électromyographique de surface du triceps brachii faible ou nulle ;
- d) L'EMG de surface intégré est constant pendant le mouvement.

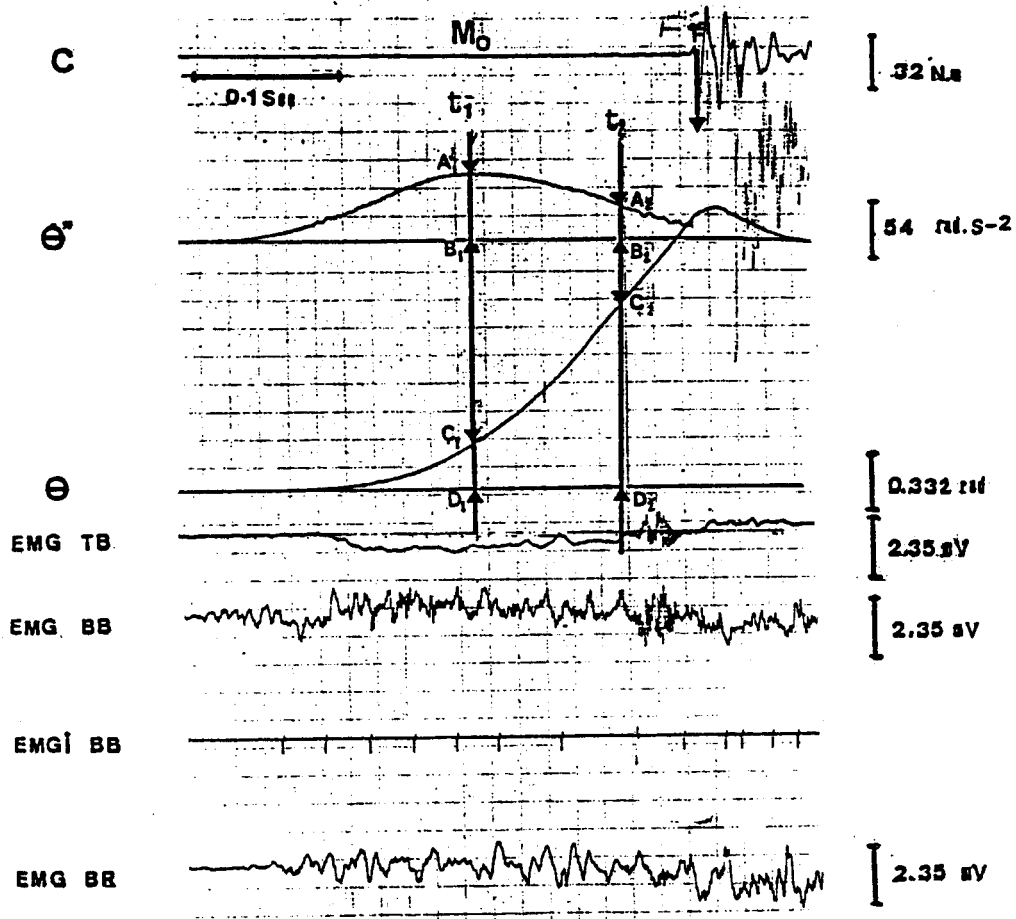


Fig. 34

Enregistrement force-vitesse (anisométrique)

- C : couple
- θ'' : accélération angulaire
- θ : déplacement angulaire
- EMG : électromyogramme de surface
- TB : triceps brachii
- BB : biceps brachii
- BR : brachioradialis
- EMGi : électromyogramme intégré
- F : moment où l'inertie (I) heurte le butoir à 120°
- t_1-t_2 : limites de temps entre lesquelles sont prises les mesures

2) CALCUL DE LA FORCE ET DE LA VITESSE INSTANTANÉES

Pendant la contraction du fléchisseur équivalent (F.E.) au sommet de la déviation de θ'' (t_1 sur la *figure 34*) et avant la bouffée freinatrice du triceps brachii (t_2 sur la *figure 34*), on mesure, tous les huit millisecondes (ms), les valeurs de θ'' et de θ . Elles permettent, par ordinateur, le calcul des forces instantanées toutes les 8 ms à l'aide de l'équation :

$$F = \theta'' I \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta}}{ab \sin \theta} \quad (\text{Figure 21})$$

Les mesures de vitesse angulaire (θ') sont obtenues par dérivation des mesures de θ après un lissage à trois points. La vitesse de raccourcissement du F.E. (V) est alors calculée :

$$V = \theta' \frac{ab \sin \theta}{\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta}} \quad (\text{Figure 21})$$

Pour chaque sujet, les résultats de force et de vitesse obtenus tous les 8 ms sont représentés sous forme d'une relation force-vitesse (*Fig. 35*).

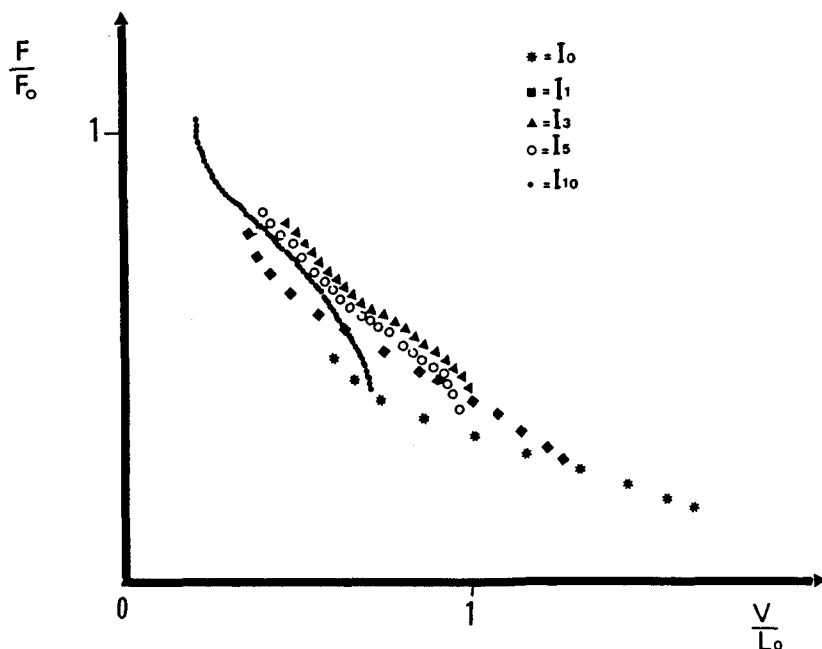


Fig. 35

Résultats de force-vitesse normalisés pour un sujet jeune ♀ (expérimentation faite avec cinq inerties différentes).

Cette figure représente, pour l'un des sujets, le diagramme sur lequel nous avons regroupé, en les individualisant, les valeurs normalisées de F (F/F_0) et de V (V/v_0) (Sujet jeune ♀, M.C.).

Ces points se regroupent suivant une relation curvilinéaire. Les ensembles de points correspondant aux différentes inerties sont décalés suivant l'axe des abscisses : la vitesse maximum atteinte est inversement proportionnelle à l'inertie. Ces points qui peuvent être présentés en valeurs réelles ou en valeurs normalisées ont ensuite fait l'objet d'un traitement mathématique au moyen d'une méthode de moindres carrés afin de les ajuster à une équation hyperbolique du type de celle proposée par HILL (1938) : $(F + a)(V + b) = c$ où a , b et c sont les paramètres de l'hyperbole. Ces paramètres ont été déterminés pour chaque sujet (Tableaux IX et X). Les équations obtenues permettent de tracer les hyperboles représentant les relations F.V. de chaque sujet.

La figure 36 représente cette relation force-vitesse, tracée dans chaque catégorie, pour un sujet présentant des caractéristiques moyennes dans sa catégorie. L'intersection de ces relations avec les axes, en particulier avec l'axe des ordonnées, traduit l'évolution de la force maximale en fonction de l'âge. Cependant, les valeurs de V maximum et de F maximum sur les axes (Fig. 36) ont évidemment des valeurs extrapolées et non des valeurs mesurées en particulier pour ce qui concerne la vitesse maximale (V_0).

Nous étudierons maintenant l'évolution de V en fonction de la croissance à 80 % et 20 % de la force isométrique à 75° (F_0) de chaque sujet. En effet, les valeurs de vitesse (V_{20} pour 20 % de F_0 et V_{80} pour 80 % de F_0) sont réellement présentes au cours des mouvements.

De plus, la valeur de 80 % retenue pour la force et la valeur correspondante de la vitesse (V_{80}) sont des critères classiquement retenus dans les méthodes d'entraînement et peuvent ainsi constituer un

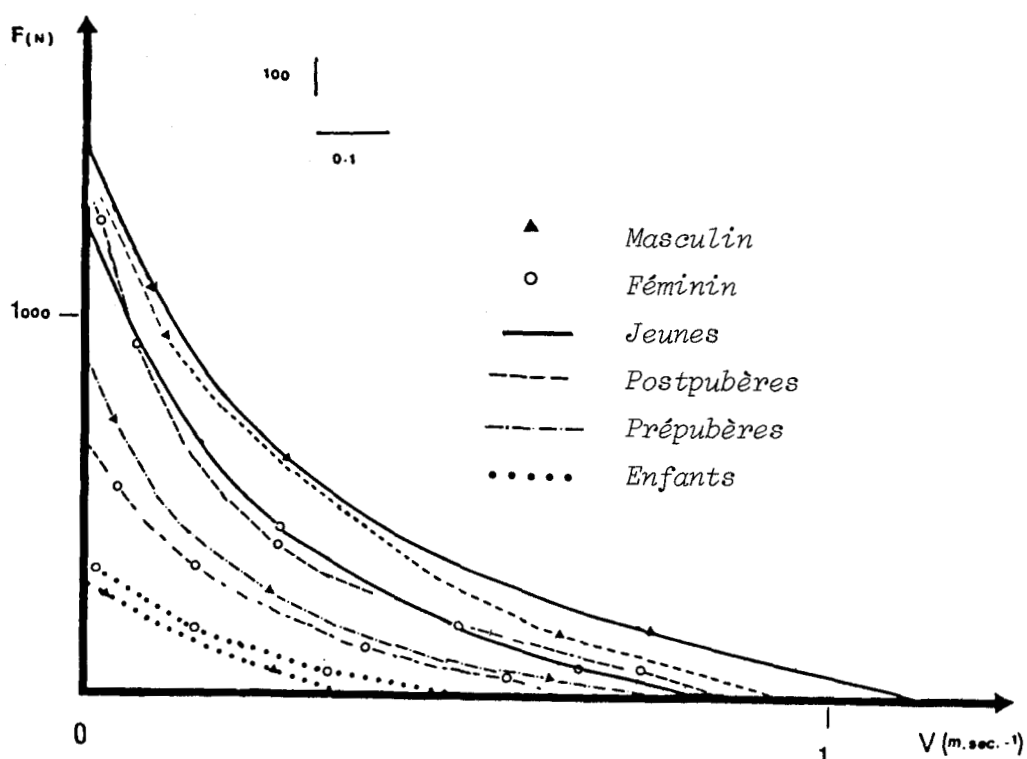


Fig. 36

Relation F.V. en valeurs réelles

Représentation d'une courbe caractéristique par catégorie

indice très utile dans le choix des méthodes d'entraînement de force et, éventuellement, de puissance.

Par contre, l'indice V_{20} correspondant à F_{20} n'est pas d'utilisation courante dans les méthodes d'entraînement et pourrait constituer un critère intéressant dans l'établissement d'une méthodologie des entraînements de vitesse, c'est-à-dire tendant à améliorer le "final" des mouvements.

B - ANALYSE DES RESULTATS

La figure 36 présente les résultats d'un sujet par catégorie. Les caractéristiques essentielles de ces relations sont les suivantes :

- Elles coupent l'axe des abscisses et des ordonnées ;
- La vitesse augmente quand la force diminue ;
- Les sujets les plus âgés sont les plus forts, ce qui avait déjà été observé au chapitre précédent ;
- Les sujets les plus âgés semblent avoir la vitesse de raccourcissement musculaire la plus grande.

1) EVOLUTION DE LA FORCE ET DE LA VITESSE EN VALEURS REELLES

a) Les *tableaux IX et X* présentent les rapports a/F_0 et b/l_0 . Ces rapports peuvent varier du simple au double. Ces résultats montrent que la relation F.V. présente de grandes différences inter-individuelles. La variabilité de ces critères est vraisemblablement due au caractère polymorphe de l'hyperbole retenue comme modèle d'équation.

b) La *figure 36* montre que F et V augmentent avec l'âge pendant la croissance et que la vitesse augmente plus vite chez les garçons que chez les filles.

2) EVOLUTION DE LA VITESSE REELLE (V_{20} et V_{80}) (Figure 37)

a) La valeur du rapport entre V_{20} et V_{80} est de l'ordre de 8 à 10 ($V_{20} \approx V_{80} \times 10$).

b) Les garçons ont dans tous les cas une moyenne de vitesse par catégorie supérieure à celle des filles.

c) V_{20} augmente dans chaque sexe mais V_{20} augmente plus vite avant la puberté chez les garçons.

d) V_{80} ne varie que très peu pendant la croissance et seulement chez les garçons, pendant la puberté.

Caté- gories	Noms	a	b	c	a/F_o	b/l_o
JEUNES	B.C.	302.16	0.212	318.90	0.28	0.69
	C.A.	181.74	0.111	310.21	0.15	0.37
	G.N.	427.28	0.278	472.07	0.41	0.92
	M.C.	262.60	0.232	268.01	0.39	0.81
POSTPUB.	D.S.	144.71	0.121	228.63	0.13	0.45
	P.N.	230.12	0.244	273.05	0.19	0.80
	B.F.	20.13	0.091	184.47	-	-
	C.V.	469.98	0.316	417.6	0.42	1
PREPUB.	D.L.	196.44	0.131	157.14	0.29	0.48
	F.M.	239.05	0.246	231.91	0.35	0.95
	O.S.	74.51	0.195	197.31	0.14	0.64
	R.C.	60.61	0.077	62.42	0.13	-
ENFANTS	L.M.	127.87	0.260	148.21	0.31	1.24
	L.A.	29.08	0.081	44.63	0.10	-
	C.C.	289.97	0.372	243.578	0.86	1.91
	L.M.	157.5	0.170	103.53	0.90	0.85

TABLEAU IX (féminin)

Relations force-vitesse

Valeurs réelles de a, b, c (féminin)

 F_o = force isométrique à 75° l_o = longueur du F.E. à 75°

Caté- gories	Noms	a	b	c	a/F_0	b/l_0
JEUNES	D.P.	131.04	0.196	370.16	0.11	0.55
	B.L.	359.84	0.333	601.25	0.22	0.94
	B.B.	1 303.68	0.618	1 860.37	0.84	1.84
	A.D.	191.80	0.373	768	0.10	1.10
POSTPUB.	G.P.	348.38	0.641	758.15	0.23	1.97
	M.B.	851.51	0.368	1 298.74	0.34	1.13
	P.L.	429.37	0.341	757.43	0.24	0.92
	S.O.	746.76	0.475	1 018.58	0.42	1.46
PREPUB.	B.R.	0.20178	0.090	134.15	-	-
	D.F.	27.27	0.190	173.60	0.05	0.69
	L.Y.	203.84	0.948	713.96	0.29	3.4
	M.E.	199.30	0.169	199.45	0.36	0.62
ENFANTS	P.D.	423.37	0.490	359.5	1.09	2.25
	L.E.	283.83	0.386	265.42	0.57	1.64
	B.N.	4.70	0.064	20.1	-	-
	D.O.	19.81	0.133	34.81	0.07	0.56

TABLEAU X (masculin)

Relations force-vitesse

Valeurs réelles de a , b , c (masculin) F_0 = force isométrique à 75° l_0 = longueur du F.E. à 75° 

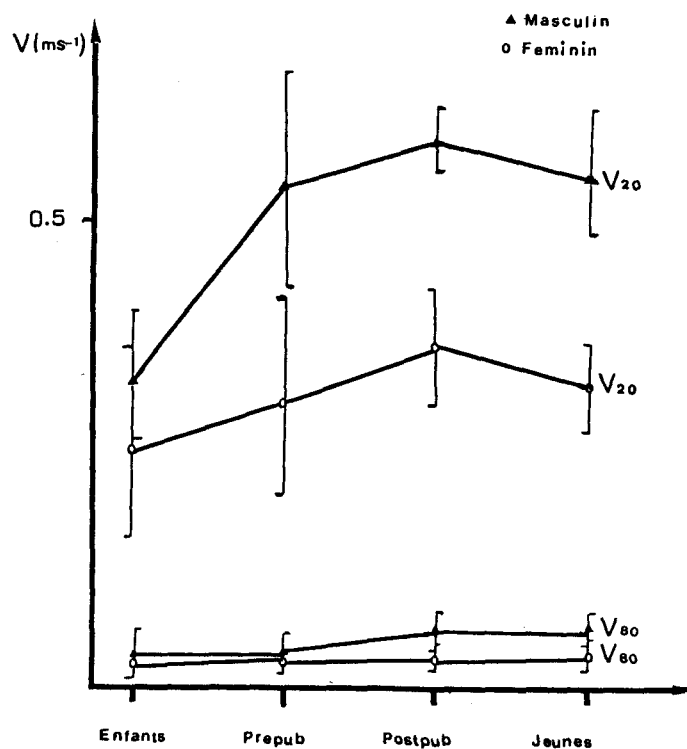


Fig. 37 - Evolution de la vitesse réelle de raccourcissement du F.E. à V_{20} et V_{80} pendant la croissance.

La valeur de l'écart-type est portée de part et d'autre de chaque valeur moyenne calculée sur quatre sujets.

3) EVOLUTION DE LA VITESSE NORMALISEE (V_{20} et V_{80})

Normaliser V permet de comparer la vitesse de raccourcissement d'une longueur standard du F.E. (Fig. 38).

a) V_{20} et V_{80} sont plus grands chez les garçons que chez les filles.

b) V_{80} ne semble pas varier pendant la croissance.

c) L'écart-type de V_{20} pour les enfants et prépubères des deux sexes est nettement plus important que celui des autres classes d'âge. Cette plus grande variabilité pourrait témoigner d'un caractère nettement plus évolutif du muscle à cette période du développement.

d) Si V_{20} ne semble pas, en moyenne, présenter une évolution nette avec l'âge chez les filles, on constate, par contre, que la vitesse relative de raccourcissement présenterait une valeur maximale au stade prépubertaire, chez les garçons. Par la suite, la vitesse relative semble décroître.

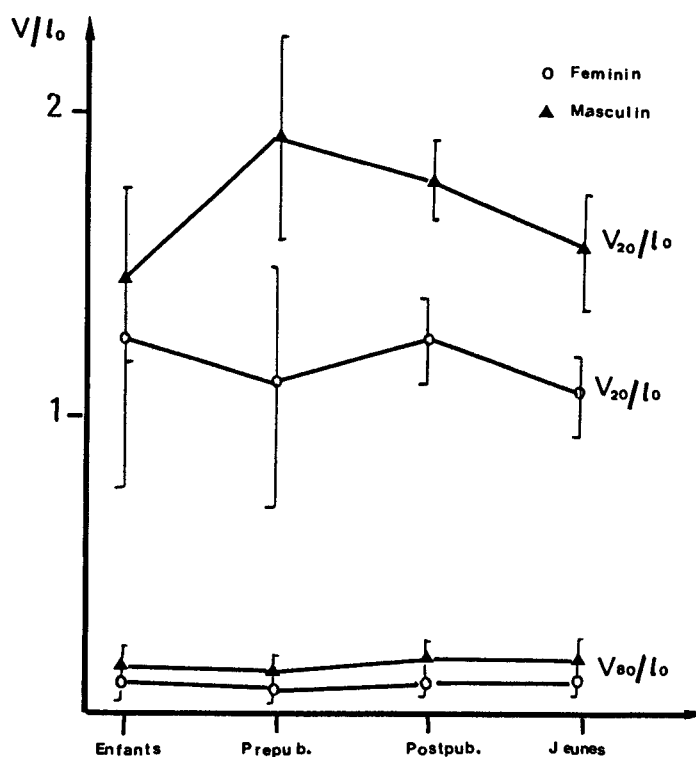


Fig. 38 - Evolution de la vitesse de raccourcissement du F.E. normalisée à V_{20} et V_{80} pendant la croissance.

La valeur de l'écart-type est portée de part et d'autre de chaque valeur moyenne calculée sur quatre sujets.

C - DISCUSSION

Les relations F.V. sont calculées pour des mouvements effectués entre les angulations de 30° et 120° . Toutefois, un certain nombre de

raisons viennent limiter la "plage utile" dans l'établissement de la relation F.V. (Figure 39).

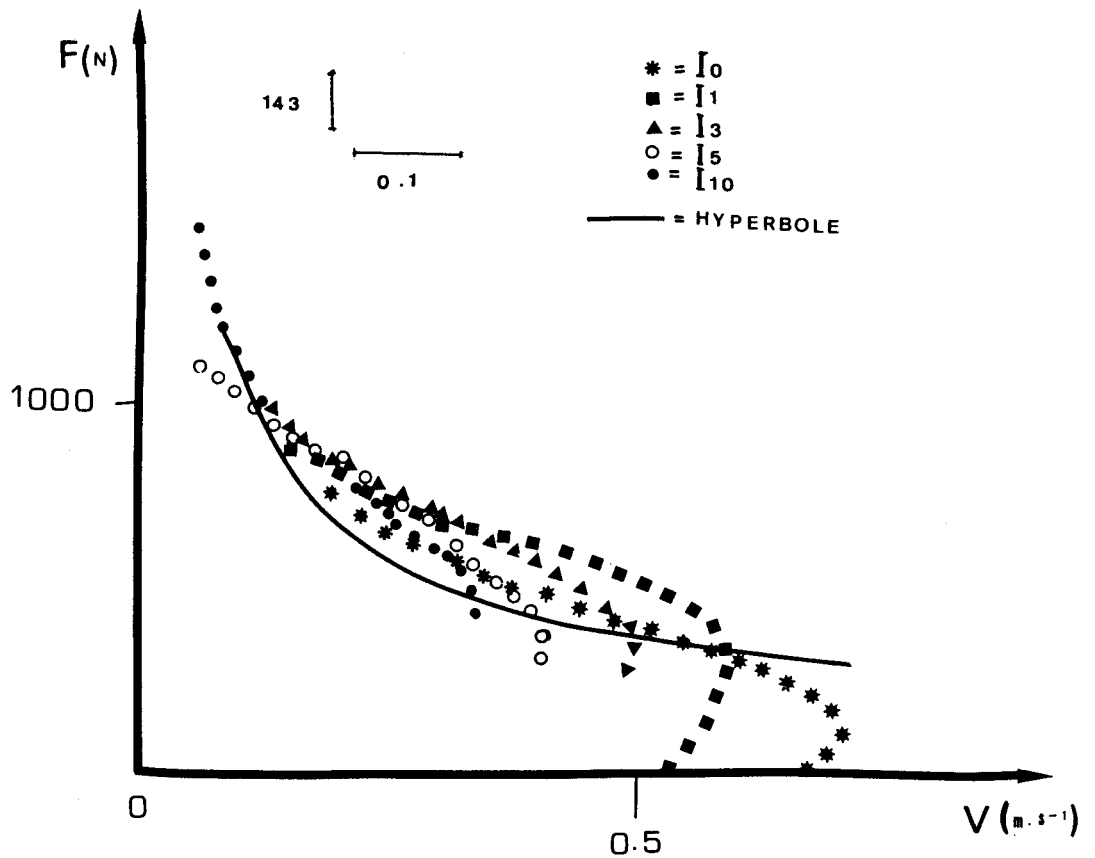


Fig. 39 - Relations F.V. (valeurs réelles) obtenues pour un sujet (jeune ♂) pour un mouvement de flexion du coude dans la plage angulaire de 30 à 120°.

Nous discuterons donc successivement les limites de la "plage utile" dans l'établissement des relations F.V., puis les résultats F.V.

1) LIMITES DE LA "PLAGE UTILE" DANS LES RELATIONS F.V.

La plage angulaire (90°) est composée d'une phase de croissance et d'une phase de décroissance de la force.

a - Phase de croissance de la force

Le principe de l'établissement de la relation F.V. est qu'à niveau d'excitation constant (EMG), on associe, pendant le mouvement, les valeurs correspondantes de la force et de la vitesse. Compte tenu du type de mouvement, la vitesse est continuellement croissante et les valeurs correspondantes de force sont décroissantes (*Fig. 35 et 36*).

Ainsi, la phase initiale du mouvement, pendant laquelle la force (et par conséquent l'accélération) croît, ne peut être utilisée. Cette phase de croissance de la force est due à deux mécanismes différents.

α) Le niveau d'excitation des muscles fléchisseurs n'est pas d'emblée maximum mais résulte d'un recrutement progressif des U.M. du groupe musculaire considéré. On ne peut théoriquement affirmer que le niveau d'excitation est maximum et constant que lorsque chacun des muscles du groupe a atteint un niveau d'excitation maximum et constant. Ce point, dans nos conditions expérimentales, est vérifié pour le biceps brachii et pour le brachio-radialis. Par contre, il ne nous est pas possible de l'affirmer pour le brachialis, celui-ci n'étant pas accessible à l'électromyographie de surface. Les deux autres fléchisseurs (extensor carpi longus et pronator teres) sont des muscles accessoires qui ne participent vraisemblablement pas de façon importante au mouvement maximal.

β) *Relation entre la composante contractile et la composante élastique série*

Même si l'excitation et l'activation étaient d'emblée maximum, le développement de la tension mécanique se trouve retardé par le fait que la C.C. se raccourcit rapidement au début de la contraction aux dépens d'un allongement important de la C.E.S., très compliant au début de la contraction. De ce fait, la tension maximale du muscle n'est atteinte qu'au bout de 100 à 150 ms en fonction de la charge. Par la suite, l'énergie mécanique stockée dans la C.E.S. sera restituée.

b - Phase de décroissance de la force

C'est cette phase qui est utilisée pour établir la relation F.V. (Fig. 34). Durant cette phase, les EMG des fléchisseurs sont constants. Toutefois, si l'on examine les valeurs calculées de la vitesse, celles-ci présentent, avant la fin du mouvement, une légère décroissance. On peut observer ce fait sur les relations F.V. présentées *figure 39*. Deux raisons peuvent expliquer cette décroissance.

α) Il apparaît fréquemment, avant même la percussion de la butée, une activité freinatrice des extenseurs, en particulier du triceps brachii. Cette activité freinatrice doit nécessairement entraîner une diminution de la vitesse de flexion.

β) Il n'est pas possible de réaliser une butée strictement rigide mais il est évidemment préférable d'utiliser une butée absorbant progressivement l'énergie développée dans le mouvement de flexion, du point de vue de la sécurité de l'appareillage comme de celle du sujet. La mise en jeu de cette butée entraîne également une décélération donc une diminution de la vitesse. Il s'agit là d'un point particulièrement important et les consignes de maximalité de mouvement données au sujet ne peuvent être réellement exécutées que si le sujet est totalement confiant dans l'efficacité de cette butée et que l'arrêt du mouvement n'apparaît pas comme douloureux.

c - Problèmes particuliers liés au fléchisseur équivalent

α) Le F.E. a les dimensions du B.B. La vitesse du muscle (V) est calculée à partir de la vitesse angulaire (θ' , *figure 21*). Dans le rapport entre V et θ' intervient la valeur du bras de levier du B.B.

Or, au cours du mouvement de flexion, le bras de levier croît jusqu'à une valeur de θ égale à environ 100° . Au-delà, le bras de levier décroît. Par conséquent, même si la vitesse angulaire restait constante, on observerait une décroissance de la vitesse musculaire en fin de mouvement.

β) La relation force-vitesse est telle que la force développée par le muscle devient nulle lorsque sa vitesse maximale (V_0) de raccourcissement est atteinte. Sans que nous puissions en apporter la preuve expérimentale, il est possible que certains des muscles du groupe des fléchisseurs puissent atteindre, compte tenu de leur géométrie, leur vitesse maximale de raccourcissement avant la fin du mouvement.

Cette éventualité ne peut être écartée au vu de l'étude théorique effectuée par WILKIE (1950) sur le groupe des fléchisseurs du coude.

De ce fait, la plage angulaire utile que nous avons retenue pour l'étude des relations force-vitesse a été limitée en fin de mouvement à un angle de 95° .

2) RELATION FORCE-VITESSE

a) Les V_{80} correspondent à des contractions ou mouvements à vitesse lente. La *figure 37* ne révèle pas d'évolution nette de cette vitesse sinon que les V_{80} sont légèrement plus élevées chez les garçons que chez les filles. Même en normalisant ces vitesses par rapport à la longueur standard du muscle (*Fig. 38*), la même tendance se manifeste.

b) Par contre, les V_{20} correspondent à des contractions ou mouvements rapides et sont beaucoup plus indicatives des modifications des qualités musculaires. Il semblerait que l'évolution de la vitesse de raccourcissement musculaire V_{20} (et vraisemblablement, par extrapolation, la vitesse maximale V_0) traduise l'interférence de plusieurs facteurs au cours de la croissance.

En effet, la vitesse de raccourcissement musculaire peut être modifiée par :

- l'augmentation générale de la longueur du muscle (COMER, 1956 ; TABARY *et al*, 1976) ;
- la fonctionnalisation de certains sarcomères et en particulier des sarcomères en position polaire (GOLDSPINK, 1968) ;
- la modification du type de fibres musculaires (lentes ou rapides) (KUGELBERG, 1976 ; MARTIN, 1978).

α) Avant la puberté, on observe, chez les garçons un "gain" de vitesse plus important que chez les filles.

Cette phase de la croissance pourrait donc vraisemblablement être caractérisée par une fonctionnalisation de certains sarcomères (GOLDSPIK, 1968) associée à une augmentation générale de la longueur du muscle (*Tableau I*).

Comme, par ailleurs, l'étude de la croissance staturale ne fait pas apparaître de différence sensible entre les garçons et les filles avant la puberté (*Tableau I*), il se pourrait que le "gain" de vitesse pré-pubertaire soit plutôt lié à une fonctionnalisation des sarcomères. Cette fonctionnalisation peut masquer, au niveau des fibres musculaires, un processus parallèle de transformation des fibres rapides en fibres lentes, plus accéléré chez les filles que chez les garçons.

β) Au cours de la puberté, ce "gain" de vitesse semble être comparable chez les deux sexes. Durant cette phase, il se pourrait que le gain de vitesse soit plus strictement lié à l'augmentation de croissance staturale, donc à l'augmentation de la longueur du muscle (*Tableau I*).

γ) Enfin, durant la période post-pubertaire, on assiste, autant chez les garçons que chez les filles, à une légère diminution de V_{20} . Or, la croissance staturale est à peu près stabilisée à cette période. La diminution de V_{20} pourrait alors être liée à une légère évolution des U.M. rapides vers les U.M. lentes. Ceci ne signifie pas que cette évolution des U.M. n'existe pas avant et pendant la puberté mais cela pourrait, dans ce cas, être masqué par les autres facteurs intervenant dans le "gain" de vitesse.

Quoi qu'il en soit et à toutes les périodes de la croissance, les V_{20} sont plus élevées chez les garçons que chez les filles. On pourrait invoquer, à cet égard, que "l'explosion" de croissance staturale pubertaire est plus marquée chez les garçons que chez les filles. Mais la différence est déjà nette dans la période prépubertaire. Aussi, il serait possible que, dès l'enfance, une différence fondamentale de qualité musculaire existe entre les sexes. La réalité est têtue. Que l'on soit misogynne ou féministe, il existe, entre les deux sexes, des différences certaines....

D - RELATION PUISSANCE-VITESSE INSTANTANÉE

1) RELATION PUISSANCE-VITESSE (PV)

La puissance est calculée au moyen de l'équation :

$$P (w) = F(N) \times V(m^{s^{-1}}) \text{ où } P \text{ est exprimé en watts.}$$

A partir de l'équation de *HILL (1938)*, $(F + a) (V + b) = c$,
on a :

$$F = \frac{c}{V + b} - a$$

d'où

$$P = FV = V \left(\frac{c}{V + b} - a \right)$$

Connaissant les paramètres a , b , c , il suffit d'introduire des valeurs de V pour connaître P et tracer la relation PV.

Nous avons regroupé sur un même graphique huit relations puissance-vitesse (*Fig. 40*), tracées dans chaque catégorie et pour un

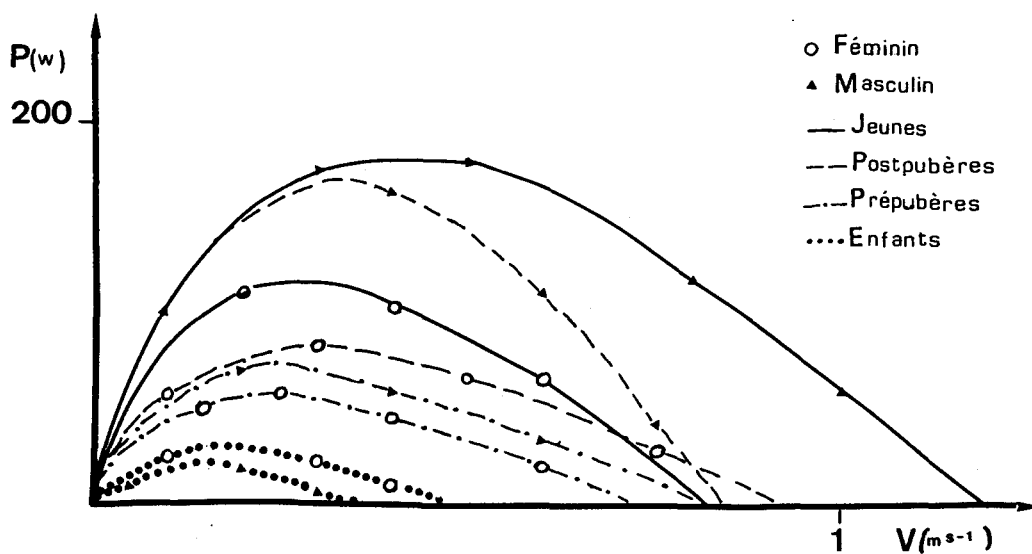


Fig. 40 - Relations puissance-vitesse pendant la croissance. Représentation d'une courbe caractéristique par catégorie.

sujet présentant les caractéristiques moyennes de sa catégorie.

On remarque sur chaque courbe que la puissance instantanée est fonction de V . La puissance croît assez rapidement aux vitesses faibles, puis atteint un maximum au-delà duquel elle décroît régulièrement pour s'annuler à la vitesse maximale. Le maximum de P paraît toujours atteint entre 30 et 40 % de la vitesse maximale. *PERTUZON (1972)*, sur des populations d'adultes, situe le maximum de P à 36 % de la vitesse maximale environ.

2) PUISSANCE MAXIMALE

Nous avons calculé la puissance maximum ($P_{\max}$) pour chaque sujet et nous avons noté la vitesse correspondante ($V_{p\max}$).

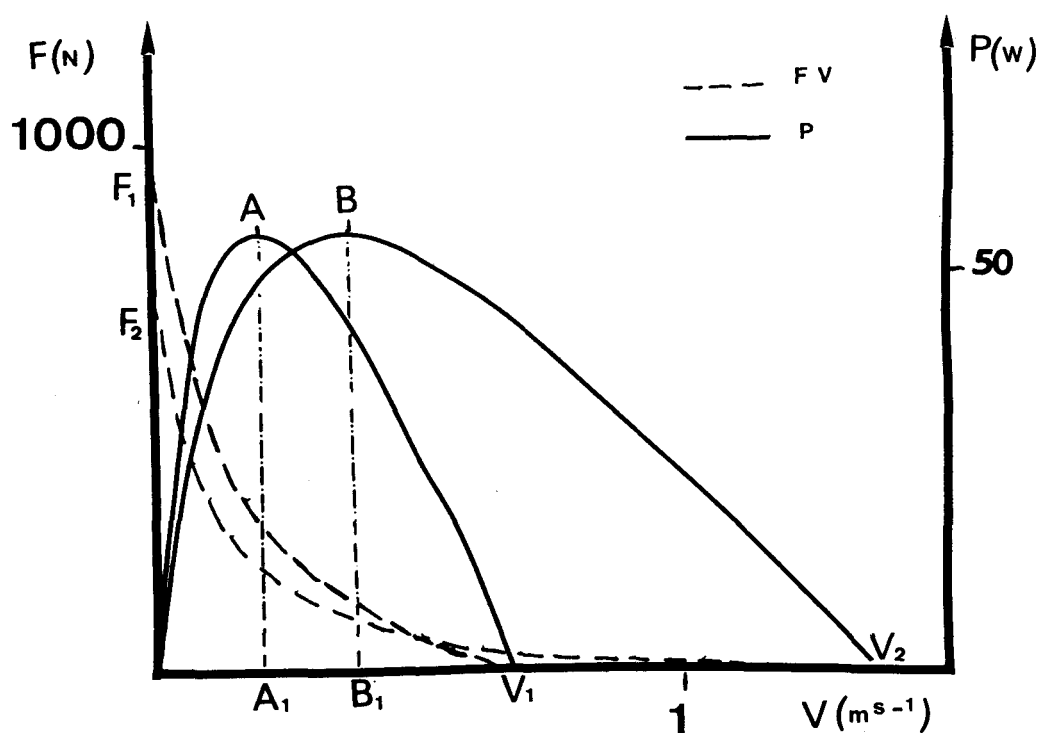


Fig. 41 - Relation puissance-vitesse de deux sujets (A et B) prépubères féminins ayant la même puissance maximum.

En trait continu : relation puissance-vitesse
En tirets pleins : relations force-vitesse

$F(N)$: force

$P(w)$: puissance

F_1V_1 : relation FV de A

F_2V_2 : relation FV de B

A_1 : vitesse du sujet A à puissance maximale

B_1 : vitesse du sujet B à puissance maximale

a) La *figure 41* représente les relations PV établies pour deux sujets prépubères féminins ayant la même $P_{\max}$ pour des $V_{\max}$ très différentes.

b) L'ensemble des $P_{\max}$ et des $V_{\max}$ ont été moyennées par catégorie (*Fig. 42*). Les valeurs de chacune des huit catégories ont été ajustées à une relation linéaire. La valeur élevée du coefficient de

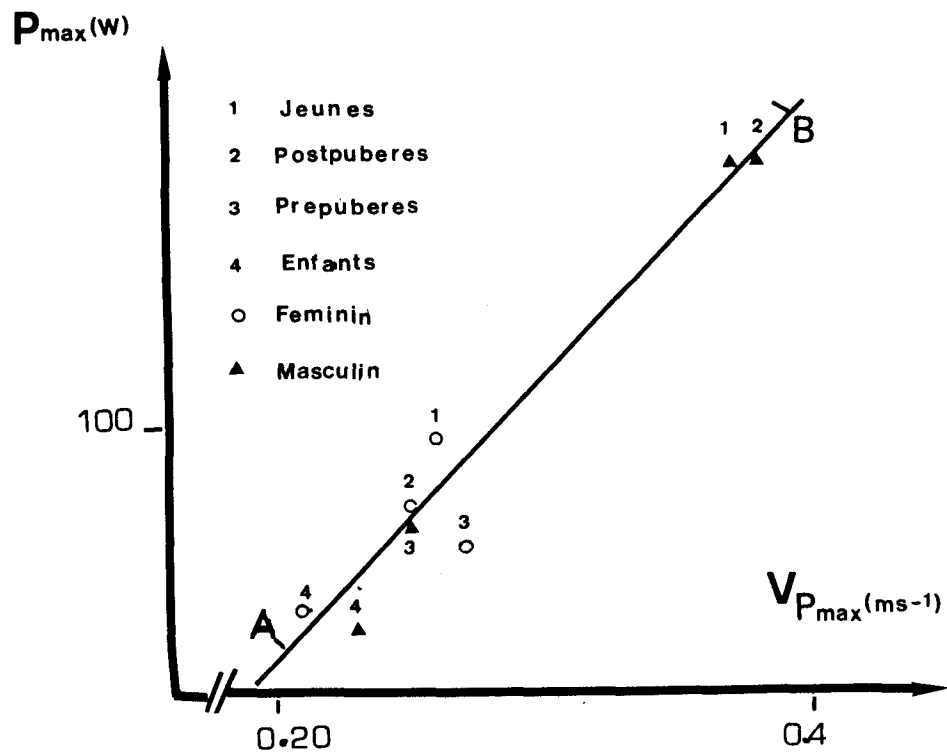


Fig. 42 - Relation $P_{\max}$ $V_{\max}$ pendant la croissance pour les deux sexes. La droite de régression a une pente de 1 072 ($r = 0.9396$).

$P_{\max}$: puissance maximum

$V_{\max}$: vitesse de raccourcissement à puissance maximale

corrélacion montre que, quelle que soit la catégorie d'âge et de sexe, le rapport reste approximativement constant entre $P_{\max}$ et $V_{\max}$.

c) Nous avons représenté (Fig. 43) l'évolution de la $P_{\max}$ pour les différentes catégories d'âge. La $P_{\max}$ évolue linéairement et positivement chez les filles au cours de la croissance. Chez les garçons, la $P_{\max}$ semblable à celle des filles, pendant la prépuberté, double pendant la puberté, se stabilise et même diminue légèrement ensuite.

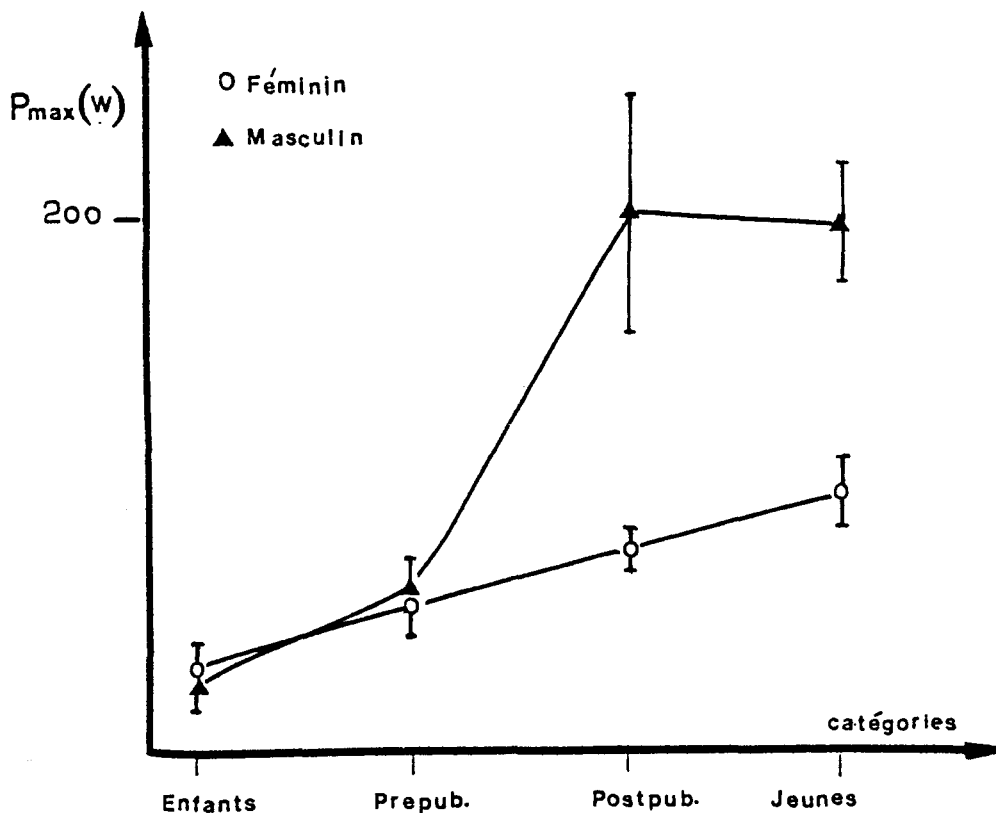


Figure 43

Relation entre la puissance maximum ($P_{\max}$) et l'âge pendant la croissance.

Les différents points sont les moyennes de $P_{\max}$ calculées par catégorie.

(Valeurs moyennes et écarts-types).

3) ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons vu précédemment que la puissance variait pendant l'exécution d'un geste, dans des conditions d'inertie et d'excitation constantes et que cette même puissance variait avec la croissance.

a - Variation de la relation P.V. pendant la croissance

La *figure 40* représente un sujet par catégorie et illustre l'évolution de la P et de la V. Les sujets représentés ici sont les mêmes que ceux de la *figure 36* (FV). On constate que :

1°) Toutes les courbes passent par un maximum de puissance en deçà et au-delà duquel la P diminue pour tendre vers zéro. Cette puissance maximale (P_{max}) est l'illustration, pour l'individu considéré, qu'il existe une condition de force et de vitesse, toutes deux sous-maximales, pour lesquelles un maximum de puissance est développé.

2°) Quelles que soient les vitesses rencontrées, la puissance croît avec l'âge.

3°) Dès la puberté, les garçons ont toujours une puissance supérieure à celle des filles.

4°) Il semble que les plus grandes vitesses maximales soient toujours celles des individus ayant la plus grande puissance.

b - Signification de P_{max} et de V_{pmax}

On peut constater (*Fig. 41*) que deux sujets peuvent, dans une épreuve, développer une même puissance maximum pour des qualités de F et de V différentes. Pour être "puissant", il est nécessaire d'être à la fois rapide et fort. La recherche d'une puissance maximale conduit donc l'entraîneur et l'athlète à rechercher le compromis efficace entre la force et la vitesse de raccourcissement musculaire.

c - Relation puissance-vitesse et performance

Compte tenu de la relation force-vitesse et de la forme de la relation puissance-vitesse (*Fig. 40 et 41*), l'exécution d'un geste passe par plusieurs phases successives.

En début de mouvement, la force est élevée et la vitesse est faible. Il y correspond une forte augmentation de l'accélération jusqu'à une valeur maximale (*Fig. 34*). Durant cette première phase, de l'énergie mécanique est stockée par la C.E.S. On atteint alors progressivement une deuxième phase du mouvement où les conditions de Pmax sont réalisées ; c'est à cet instant que le muscle fournit à l'ensemble en mouvement un maximum d'énergie. Dans le même temps, la force commence à décroître (*voir le tracé d'accélération figure 34*) et l'énergie stockée dans la C.E.S. est progressivement restituée. La fin du mouvement s'effectue pour des niveaux de force plus faibles et a surtout pour effet de parachever l'augmentation de la vitesse.

Ainsi donc, il apparaît, au regard de la performance, que les deux phases essentielles du mouvement sont, d'une part, la phase initiale (l'impulsion) et, d'autre part, la phase pendant laquelle la puissance maximale du muscle est utilisée.

D'après WEINECK (1983), par l'entraînement, la force peut être doublée alors que la vitesse ne peut être élevée que de 15 à 20 %. ISRAEL (1977) pense que les gains en vitesse maximale sont génétiquement prédéterminés et souvent limités. Il admet que la vitesse maximale s'établit très tôt. Ce même auteur ajoute que "ce qui n'a pas été développé en temps utile ne peut être rattrapé par la suite".

d - Evolution de la Pmax pendant la croissance et entraînement en force et en vitesse

Au cours de la croissance, la Pmax évolue de façon différente chez les filles et les garçons. Les manuels d'entraînement n'en tiennent pas compte clairement. La plupart de ces manuels paraissent asexués mais sont en fait conçus à partir de modèles d'entraînement masculin.

Par ailleurs, l'évolution de la Pmax avec l'âge (*Fig. 43*) est très semblable à celle de la force isométrique (F_0) (*Fig. 31*). On peut penser que dans le processus de croissance normale, sans entraînement systématique, ce qui est le cas de nos sujets, la force est l'élément déterminant de la Pmax.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS

A - PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES MUSCULAIRES	113
B - DÉVELOPPEMENT ET PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES DU MUSCLE	116
1. CROISSANCE MUSCULO-SQUELETTIQUE	116
2. SECRETION HORMONALE	116
C - MATURATION MUSCULAIRE ET ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES	117
1. AUGMENTATION DU NOMBRE DE SARCOMERES	117
2. TRANSFORMATION DES FIBRES MUSCULAIRES	118
D - ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES DU MUSCLE ET ENTRAÎNEMENT	118
1. L'ENFANT ET L'ENTRAÎNEMENT	118
2. ENTRAÎNEMENT ET SEXE	119
3. AGE ET ENTRAÎNEMENT MUSCULAIRE	119

L'objet de cette étude était de tenter de connaître, sur quarante sujets considérés comme normaux, non entraînés et en période de développement, l'évolution des propriétés biomécaniques du muscle in situ.

Les résultats nous ont permis de confirmer, à partir du modèle de HILL (1951), les caractères généraux observés sur le muscle mature et d'affirmer qu'il est possible de mesurer chez l'enfant les mêmes relations biomécaniques musculaires que chez l'adulte.

Enfin, les résultats et les discussions de chaque chapitre permettent de dire que, pendant la croissance, le couple, la force, la vitesse de raccourcissement musculaire et la puissance évoluent, changent quantitativement cependant que la compliance-série paraît toujours rester sensiblement à la même valeur (CLOSE, 1964).

Le muscle féminin paraît, au cours de la croissance et jusqu'à la fin de la puberté, augmenter très régulièrement ses valeurs de force, de vitesse et de puissance. Au-delà de la puberté se dessine une légère diminution de ces variables biomécaniques (Fig. 44).

Le muscle masculin a une évolution prépubertaire semblable à celle du muscle féminin quant au couple à 75° et à la puissance maximum. Pendant la puberté, vraisemblablement sous l'influence du système hormonal, les valeurs de couple et de P_{max} doublent en six ans. Elles semblent se stabiliser au-delà de dix-huit ans. La vitesse (V_{20}) est déjà supérieure chez les garçons à six ans. Elle augmente rapidement pendant la puberté pour se stabiliser par la suite. La vitesse V_{80} est huit à dix fois inférieure à V_{20} (Fig. 44).

A - PROPRIETES BIOMECHANQUES MUSCULAIRES

L'évolution du couple, de la vitesse et de la puissance, ainsi que la stabilité de la compliance-série, nous permettent de constater :

Synthèse des figures 31, 37, 43

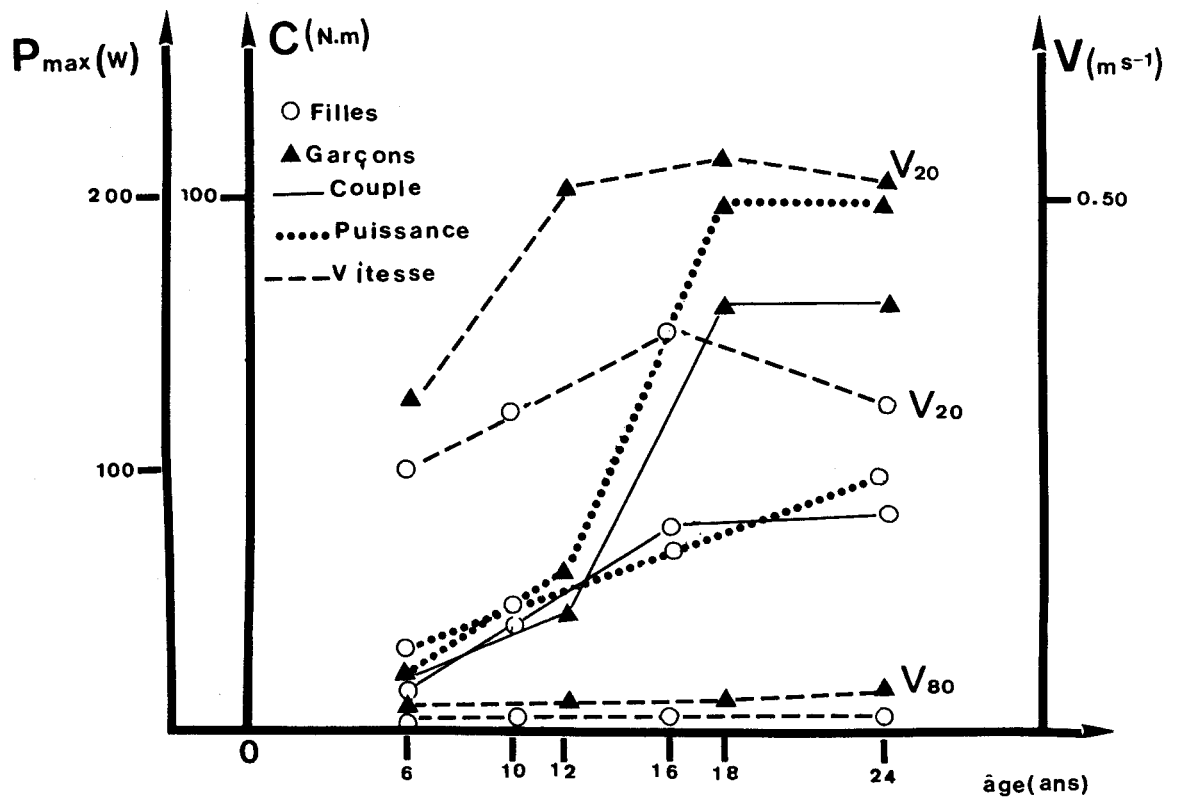


Fig. 44

Evolution des propriétés biomécaniques du muscle pendant la croissance chez les filles et les garçons.

$P(max)$: puissance maximale en Watts

C : couple à 75° en Newton-mètres (contraction isométrique)

V : vitesse de raccourcissement en mètres par seconde

V_{80} : vitesse à 80 pour cent de la force (F_0)

V_{20} : vitesse à 20 pour cent de la force (F_0)

1) Que les muscles féminins et masculins semblent avoir, jusqu'à la fin de la prépuberté, des propriétés semblables et sensiblement de même valeur, à l'exception des qualités de vitesse (V_{20}) qui paraissent refléter des spécificités sinon originelles du moins antérieures à six ans.

2) La compliance série ne paraît pas évoluer pendant la croissance. *CLOSE* (1964) propose les mêmes conclusions à propos de jeunes rats.

Néanmoins, il reste vrai que la mesure de la compliance-série in situ par la méthode de Q.R. pose trois problèmes essentiels qui peuvent mettre en question la validité des mesures.

a - Problème physiologique

Puisque le niveau d'excitation varie d'une mesure à l'autre à cause de la variation de la force, la mesure de la compliance-série ne porte ni sur le même nombre de fibres musculaires actives (*VIGREUX et PERTUZON, 1982*), ni sur des fibres musculaires battant à la même fréquence (*MATON, 1975*).

b - Problème d'appareillage

La brutalité de la croissance de l'accélération au moment du déclenchement du mouvement et le temps de réponse du dispositif d'enregistrement obligent à extrapoler le tracé pour mesurer l'accélération initiale. C'est une source d'erreur non négligeable.

c - Problème de protocole

Par ailleurs, la mesure de la compliance-série repose sur un protocole expérimental complexe. En effet, le sujet doit initialement développer une contraction isométrique et isotonique, en contrôlant lui-même le caractère isotonique de cette contraction. C'est pendant cette phase que l'expérimentateur doit choisir l'instant de déclenchement du mouvement de

quick-release. Le sujet doit alors particulièrement veiller à ne pas aider, ni freiner le mouvement. Le respect scrupuleux de ce protocole est difficile à obtenir chez les enfants et même chez les prépubères. Cette simple analyse des protocoles expérimentaux conduit à suspecter la validité des mesures effectuées. Ainsi, l'interprétation des mesures de compliance ne peut être que très prudente.

3) De cette étude, il ressort que le muscle humain, pendant la croissance et sans entraînement, augmente naturellement ses capacités à développer un couple, à accélérer le "final" d'un geste et à développer une puissance toujours supérieure. Cette réalité pose le problème de la part relative de progrès à accorder respectivement aux exercices choisis et aux transformations naturelles dues à la croissance, dans l'entraînement sportif.

B - DEVELOPPEMENT ET PROPRIETES BIOMECHANQUES MUSCULAIRES

Ces propriétés biomécaniques musculaires dépendent essentiellement de la façon dont se structure le muscle et des mécanismes physiologiques qui contrôlent ce développement en fonction du sexe. Nous discuterons donc successivement de la croissance et des contrôles hormonaux de la croissance.

1) CROISSANCE MUSCULO-SQUELETTIQUE

La croissance staturale, plus importante chez les garçons que chez les filles (*Tableau I*) mais plus tardive, agit sur la géométrie musculo-squelettique par l'augmentation des bras de levier et la longueur des muscles considérés (*COMER, 1956*). La force va se trouver augmentée.

2) CONTROLE HORMONAL

Peu avant la phase pubertaire, la testostérone décuple (5 Ng) chez les garçons, la montée étant beaucoup plus discrète chez les filles (0,4 Ng)

(REITER and ROOT, 1975 ; DE MAREES, 1979). La répercussion au niveau du muscle se produit pendant la puberté, par augmentation de toutes les dimensions des fibres musculaires. Le rapport entre la masse musculaire et la masse corporelle va passer de 24 à 40 % chez le garçon pendant la puberté cependant que chez les filles, ce rapport augmentera beaucoup moins (WEINECK, 1983).

Ces mécanismes de croissance expliquent, en partie, la rupture du parallélisme prépubertaire entre les garçons et les filles dans la plupart des propriétés biomécaniques musculaires, surtout en force et en puissance, avec toutefois une réserve pour ce qui est de la compliance, pour les raisons exposées plus haut.

C - MATURATION MUSCULAIRE ET ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES DU MUSCLE

La maturation musculaire semble s'organiser, entre autre, à partir de deux mécanismes contradictoires : l'augmentation du nombre de sarcomères et la transformation des fibres de type II, FT (rapides) en fibres de type I, ST (lentes).

1) AUGMENTATION DU NOMBRE DE SARCOMERES

D'après GOLDSPINK (1971), TABARY et coll. (1976), pendant la croissance, l'augmentation du nombre de sarcomères s'opère chez les mammifères par les extrémités des fibres musculaires. Ils apparaissent en position polaire, se forment, sont d'abord non-fonctionnels, puis fonctionnels et quittent, par addition de nouveaux sarcomères non-fonctionnels, les régions polaires du muscle.

Ce mécanisme conduit, au niveau de la fibre, à une augmentation de la vitesse de raccourcissement donc de la puissance.

2) TRANSFORMATION DES FIBRES MUSCULAIRES

Pendant la croissance, chez le rat, le pourcentage de fibres FT à contraction rapide diminue de 33 à 10 % au profit du nombre de fibres ST à contraction lente qui augmente de 67 à 90 % (CLOSE, 1972 ; KUGELBERG, 1976).

A l'inverse de la croissance staturale et de l'augmentation du nombre de sarcomères, cette transformation des fibres musculaires va à l'encontre de l'augmentation de la vitesse de raccourcissement. Cependant, l'étude de la relation force-vitesse (*Chapitre VI*) montre que la vitesse de raccourcissement musculaire a tendance à augmenter avec l'âge. Ceci nous permet d'affirmer que la transformation de certaines fibres à contraction rapide, en fibres à contraction lente, est masquée par l'importance des autres mécanismes cités plus haut, augmentation de la masse musculaire et de la longueur fonctionnelle des fibres.

D - EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS BIOMÉCANIQUES DU MUSCLE ET ENTRAÎNEMENT

Il ne s'agit pas de traiter ici de l'entraînement mais d'approcher quelques problèmes généraux que font apparaître nos résultats.

1) L'ENFANT ET L'ENTRAÎNEMENT

Pendant longtemps, l'entraînement de l'enfant a été copié sur celui de l'adulte. Nous réduisions seulement les charges en fonction de nos ambitions ou de l'image idyllique que nous possédions de ce "petit homme". Nos critères essentiels restent encore empiriques et ne procèdent pas d'une identification scientifique des propriétés du muscle. Toutefois, certains auteurs récents (NADEAU et PERONNET, 1980 ; WEINECK, 1983) procèdent d'une démarche scientifique qui inclut le développement de l'enfant en liaison avec l'entraînement. Nos conclusions ne paraissent pas en contradiction avec leurs travaux, bien au contraire...

2) ENTRAÎNEMENT ET SEXE

NADEAU et PERONNET (1980) écrivent que "... de 1924 à 1980, les femmes semblent avoir améliorer leurs performances à un rythme plus rapide que les hommes". Il n'est naturellement pas possible pour l'instant, de faire la part des différents facteurs de cette amélioration.

En général, l'entraînement sportif est construit sur le modèle masculin. L'échec des anabolisants chez l'athlète féminin et ses conséquences virilisantes par les androgènes mettent en évidence le fait que l'entraînement féminin doit être spécifique et approché sous un autre angle scientifique. Les éléments que nous pouvons apporter concernant la progression linéaire des qualités biomécaniques musculaires féminines pendant la croissance peuvent participer à une approche nouvelle de l'entraînement sportif chez les sujets féminins.

3) AGE ET ENTRAÎNEMENT MUSCULAIRE

Il est conseillé chronologiquement, pour la carrière d'un athlète, de s'entraîner plus spécialement en vitesse avant la puberté et en force pendant la puberté. "L'entraînement en force ne paie pas avant la puberté" (WEINECK, 1983). Ces pratiques des entraîneurs correspondent exactement aux périodes naturelles de développement de ces propriétés biomécaniques chez les garçons, telles que nos résultats nous les font constater. Cet entraînement est-il aussi bien ajusté pour les filles ?

a) Les propriétés biomécaniques du muscle du jeune sportif entraîné évoluent naturellement de par la croissance dans un sens positif c'est-à-dire vers l'amélioration de la performance. Les facteurs d'amélioration de la performance étant multiples, il serait important, au moins dans un premier temps, de préciser la part relative jouée, d'une part, par la croissance et, d'autre part, par l'entraînement.

Il serait alors plus facile de valider ou d'invalider expérimentalement certains types d'exercices autrement que par l'empirisme. Les techniques que nous avons utilisées devraient permettre d'y contribuer.

b) Faut-il entraîner plus spécialement l'athlète en force et/ou en vitesse dans les périodes où la force et/ou la vitesse croissent naturellement ?

Faut-il entraîner plus spécialement l'athlète en force et/ou en vitesse dans les périodes où ces propriétés musculaires stagnent ou régressent naturellement ?

Faut-il entraîner constamment en force et en vitesse ?

Il semble que la solution actuellement adoptée soit d'entraîner les athlètes en force et en vitesse pendant les périodes où ces propriétés augmentent déjà naturellement de par la croissance.

Il serait peut-être possible de proposer une chronologie des types d'entraînement plus adaptée au développement. Mais quoi que nous puissions proposer à partir de nos résultats, il serait de toute façon nécessaire de valider ces propositions par une étude chronologique des propriétés biomécaniques du muscle sur une même population d'enfants entraînés, durant toute sa période de croissance.

c) Par ailleurs, la transformation des fibres rapides (FT) en fibres lentes (ST) pendant la croissance paraît être un facteur négatif par rapport aux performances de vitesse. Sur des mammifères sexuellement matures mais encore en croissance, *MARTIN (1978)* analyse la composition des fibres musculaires de rats qu'il a soumis à un régime journalier de centrifugeuse (activité musculaire statique). La transformation des fibres FT en fibres ST s'accélère. Ne peut-on réaliser l'inverse de ce processus par des exercices de vitesse chez l'homme ?

Des résultats récents (*DUCHATEAU, 1981*) obtenus au moyen d'entraînements par électrostimulation musculaire font apparaître des résultats parfois paradoxaux. Ainsi, après avoir montré que l'entraînement isométrique augmente la force maximale de 28 % et la vitesse de contraction

de 19 % cependant que l'entraînement dynamique (dit parfois isotonique) augmente la force maximale de 6 % et la vitesse de contraction de 52 %, il démontre que :

- . l'entraînement isométrique augmente l'amplitude de la secousse sans modifier le temps de développement de la force ;
- . l'entraînement dynamique présente une réduction paradoxale de l'amplitude de la secousse avec raccourcissement du temps de développement de la force.

Ces résultats nous montrent qu'il est sans doute possible d'envisager de contrôler, par des techniques appropriées, l'évolution des types de fibres musculaires, pendant la croissance, par l'entraînement.

De telles techniques ne constituent peut-être pas un objectif souhaitable pour l'ensemble des populations mais il ne fait aucun doute que dans le domaine de la haute compétition les "spécialistes" choisiraient d'y recourir...

BIBLIOGRAPHIE

- ACHESON, R.M. (1966)
Maturation of the skeleton in human development.
W.B., Saunders Company, 1 vol., Falkner F., ed. Philadelphie et Londres, 16, 465-502.
- ADRIAN, E.D. and BRONK, D.W. (1929)
The discharge of impulses in motor nerve fibers. The frequency of discharge in reflex and voluntary contraction.
J. Physiol., London, 67, 119-151.
- ANDERSEN, E. (1968)
Skeletal maturation of Danish School children in relation to height sexual development and social conditions.
Acta Paedit. scandinav., suppl. CLXXXV.
- ANGEL, R.W., EPPLER, W. et IANNONE, A. (1965)
Silent periode produced by unloading of muscle during voluntary contraction.
J. Physiol., London, 180, 864-870.
- APPELBERG, B. and EMONET-DENAND, F. (1967)
Motor units of the first superficial lumbrical muscle of the cat.
J. Neurophysiol., 30, 154-160.
- AUBERT, X. (1956)
Le couplage énergétique de la contraction musculaire.
Arscia ed., Bruxelles, 1 vol. 320 p.
- BAGUST, J., LEWIS, D.M., WESTERMAN, R.A. (1973)
Polyneuronal innervation of kitten skeletal muscle.
J. Physiol., 229, 241-255.
- BALHER, A.S., FALES, J.T. and ZIERLER, K.L. (1968)
The dynamic properties of mammalian skeletal muscle.
J. Gen. Physiol., 51, 369-384.
- BAYLEY, N. (1943)
Size and body build of adolescence as a basis for determining percentage of completed growth.
Child Developm., XIV, 1-46.
- BENOIT, P. and CHANGEUX, J.P. (1975)
Consequences of tenotomy on the evolution of multi-innervation in developing rat soleus muscle.
Brain Res., 99, 354-358.
- BERKALOFF, A., BOURGET, J., FAVARD, P., GUINNEBAULT, M. (1967)
Biologie et Physiologie cellulaires.
Collection Méthodes, Ed. Hermann, Paris, 322 p.
- BLIX, M. (1893)
Die Länge und die Spannung des Muskels,
Skand. Arch. Physiol., 4, 399-409.
- BOUISSET, S. (1973)
EMG and muscular force in normal motor activities.
4th Int. Congres EMG, Bruxelles, 1971. In J.E. Desmedt, "New Developments in electromyography and clinical Neurology", Karger ed., Bâle, 1, 547-583.
- BOUISSET, S. et MATON, B. (1972)
Quantitative relationship between surface EMG and intramuscular electromyographic activity in voluntary movements.
Amer. J. Physiol. Med., 51, 285-295.
- BOURGEOIS, J.M., WAGNER, P., DOMERGUE, A., DAUZAT, M., POIRIER, C., BENOIT, R. (1981)
Le sport et l'enfant.
Editions Euromed (Montpellier), 1 vol., 479 p.
- BRESSLER, B.H. and CLINCH, N.F. (1974)
The compliance of contracting skeletal muscle.
J. Physiol., London, 237, 477-493.
- X BROOKE, M.H. and KAISER, K.K. (1970)
Muscle fiber types : How many and what kind ?
Arch. Neurol., 23, 360-366.
- X BROOKE, M.H. and KAISER, K.K. (1974)
Use and abuse of muscle histochemistry.
Ann. N.Y. Acad. Sci., 228, 121-144.

- BROWN, M.D. (1973)
Rôle of activity in the differentiation of slow and fast muscle.
Nature, 244, 178-179.
- BROWN, M.C., JANSEN, J.K.S. and VAN ESSEN, D. (1976)
Polyneural innervation of skeletal muscle in newborn rats and its elimination during maturation
J. Physiol., 261, 387-422.
- BUCHTHAL, F. and ROSENFALCK, P. (1957)
Elastic properties of striated muscle.
In *Tissue elasticity*, J.W. Remington Ed., 1 vol., 73-97.
- BUCHTHAL, G.L. (1962)
The electromyogram : its value in the diagnosis of neuromuscular disorders.
World Neurology, 3, 16-34.
- X BURKE, R.E., LEVINE, D.M., TSAIRIS, P., ZAJAC, C.E. (1973)
Physiological types of histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius.
J. Physiol., 234, 723-748.
- CLAMANN, H.P. and GILLIES, J.D., SKINNER, R.D., HENNEMAN, E. (1974)
Quantitative measures of output of a motoneuron pool during monosynaptic reflexes.
J. Neurophysiol., 37, 1328-1337.
- X CLOSE, R.I. (1964)
Dynamics properties of fast and slow skeletal muscles of the rat during development.
J. Physiol., London, 173, 74-95.
- X CLOSE, R.I. (1972)
Dynamic properties of mammalian skeletal muscles.
Physiol. Rev., 52 (1), 129-197.
- CNOCKAERT, J.C. (1976)
Recherche des conditions optimales d'exécution de mouvements simples à partir de critères biomécaniques et électromyographiques.
Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Lille I, 1 vol., 281 p.
- CNOCKAERT, J.C. et PERTUZON, E. (1974)
Sur la géométrie musculosquelettique du triceps brachii. Application à la détermination dynamique de sa compliance.
Eur. J. Appl. Physiol., 32, 149-158.
- COMER, R.D. (1956)
An experimental study of the "laws" of muscle and tendon growth.
The anatomical record, 125 (4), august 1936, 665-681.
- CONRADI, S. (1976)
Functional anatomy of the anterior horn motor neurone.
In *The peripheral nerve*. Ed. Landon, D.M. Chapman et Hall, London, 279-329.
- CRAGGS, H. (1970)
The longitudinal division of fibres in overloaded rat skeletal muscle.
J. Anat., 107, 459-470.
- DAWSON, P.M. (1935)
The physiology of physical education.
Baltimore, Williams and Wilkins Company.
- X DE MAREES, H. (1979)
Sport-physiologie.
Tropon, Köln (cité par WEINECK, 1983).
- DESMEDT, J.E. and GODAUX, E. (1977a)
Ballistic contractions in man : characteristic recruitment pattern of single motor units of the tibialis anterior muscle.
J. Physiol., 264, 673-694.
- DESMEDT, J.E. and GODAUX, E. (1977b)
Fast motor units are not preferentially activated in rapid voluntary contractions in man.
Nature, 267, 717-719.
- DESMEDT, J.E. and GODAUX, E. (1979)
Voluntary motor commands in human ballistic movements.
Ann. Neurol., 5, 415-421.
- DUCHATEAU, J. (1981)
Contribution à l'étude des mécanismes physiologiques des effets de l'entraînement sur la contraction musculaire.
Thèse de Doctorat, Bruxelles, 1 vol. 210 p.

- DUCHENNE de BOULOGNE, G.B.A. (1867)
Physiologie des mouvements.
Bailliere éd., Paris, 1 vol., 872 p.
- DUFESTEL, L. (1920)
La croissance.
Paris, éd. G. Doin.
- DUFESTEL, L. (1930)
Développement physique.
In Traité d'éducation physique, éd. G. Doin, Paris.
- DÜNTZER, E. (1930)
Leibe subungen und menstruation.
Ztblt. Gyn., 29-54.
- EBASHI, S. and ENDO, M. (1968)
Calcium ion and muscle contraction.
Prog. Biophys. Molec. Biol., 18, 123-183.
- ECCLES, J.C., ECCLES, R.M. and LUNDBERG, A. (1958)
The action potential of the alpha motoneurons supplying fast and slow muscles.
J. Physiol., London, 142, 275-291.
- FALKNER, F. (1958)
Skeletal maturation, an appraisal of concept and methode.
Am. J. Physiol. Anthropol., XVI, suppl. 1-79.
- FENN, W.O., BRODY, H. et PETRILLI, A. (1931)
The tension developped by human muscles at different velocities of shortening.
Amer. J. Physiol., 97, 1-14.
- FEUER, D. (1967)
L'intégrateur convertisseur (analogique - numérique). Application à l'évaluation de l'activité électrique cellulaire.
J. Physiol., Paris, 319-321.
- FIDELIUS, K. (1968)
Some mecanical principles of muscle cooperation in the upper extremities.
Biomechanics I, 1st Int. Seminar, Zurich, Karger ed. Basel, New-York, 172-177.
- FRANKE, F. (1920)
Die Kraftkurve des menschlicher Muskeln bei Willkürlicher innervation und die Frage der absoluten Muskelkraft.
Plüg. Arch. ges. Physiol., 184, 300-322.
- GERBEAUX, M. (1981)
Comparaison de trois méthodes de mesure du moment d'inertie des segments corporels.
D.E.A., Université de Lille I, 45 p.
- GODIN, P. (1935)
Recherches anthropométriques sur la croissance.
2e éd., Paris, A. Legrand.
- GOLDSPINK, G. (1968)
Sarcomere length during postnatal growth of mammalian muscle fibres.
J. Cell Sci., 3, 539-548.
- ✓ GOLDSPINK, G. (1971)
Changes in strated muscle fibres during contraction and growth with particular reference to myofibril splitting.
J. Cell. Sci., 9, 123-137.
- ✗ GONYEA, W. (1980)
Role of exercise in inducing increases in skeletal muscle fiber number.
J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercice Physiol., 48 (3), 421-426.
- GOUBEL, F. (1974)
Les propriétés mécaniques du muscle au cours du mouvement sous-maximal.
Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Lille, 1 vol., 217 p.
- GOUBEL, F., BOUISSET, S. and LESTIENNE, F. (1971)
Determination of muscular compliance in the course of movement.
Medecine and Sport, 6, 154-158.

- GOUBEL, F. et 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. et VAN HOECKE, J. (1982)
Biomécanique et geste sportif. Incidence des propriétés mécaniques du muscle sur la réalisation de la performance.
Cinesiologie, XXI, 41-51.
- GREULICH, W.W. et PYLE, S.I. (1959)
Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist.
Stanford London, Stanford Univ. Press, Oxford Univ. Press.
- GUTMANN, E., MELICHNA, J. and SYROVY, I. (1974)
Developmental changes in contraction time, myosin properties and fibre pattern of fast and slow skeletal muscles.
Physiol. Bohemoslov., 23, 19-27.
- X HAINES, R.W. (1932)
The laws of muscle and tendon growth.
J. Anat., 66, 578-585.
- HANNERZ, J. (1974)
Discharge properties of motor units in relation to recruitment order in voluntary contraction.
Acta Physiol. Scand., 91, 374-384.
- HARRIS, J.A. (1930)
The measurement of man.
University of Minnesota Press.
- HENNEMAN, E., SOMJEN, G. and CARPENTER, D.O. (1965a)
Functional significance of cell size in spinal motoneurons.
J. Neurophysiol., 28, 560-580.
- HENNEMAN, E., SOMJEN, G. and CARPENTER, D.O. (1965b)
Excitability and inhibitability of neurones of different sizes.
J. Neurophysiol., 28, 599-620.
- HILL, A.V. (1922)
The mechanism of muscular contraction.
Physiol. Rev., 2, 310-341.
- HILL, A.V. (1938)
The heat shortening and the dynamic constants of muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 126, 136-195.
- HILL, A.V. (1950)
The serie elastic component of muscle.
Proc. Roy. Soc. B., 136, 420-435.
- HILL, A.V. (1951)
The mechanics of voluntary muscle
The lancet, 2, 947-951.
- HUNT, E.E. et GLEISER, I. (1955)
The estimation of age and sex of preadolescent children from bones and teeth.
Am. J. Phys. Anthropol., XIII, 479-487.
- HUXLEY, A.F. (1957)
Muscle structure and theories of contraction.
Progr. Biophys., 7, 255-318.
- HUXLEY, H.E. (1969)
The mechanism of muscular contraction.
Science, N.Y., 164, 1356-1366.
- HUXLEY, H.E. (1972)
Structural changes in the actin and myosin-containing filaments during contraction.
Cold Spring Haibor Symp. Quant. Biol., 37, 361-372.
- HUXLEY, A.F. (1980)
Reflexions on muscle.
Ed. Liverpool University Press, Liverpool, 111 p.
- ISRAEL, S.B. (1980)
Buhl : Die sportliche Trainierbarkeit it in der Pubeszenz.
Theoric und Praxis der KK 29, Beiheft 2, 33-35.

- JEWELL, B.R. et WILKIE, D.R. (1958)
An analysis of the mechanical components in frog's striated muscle.
J. Physiol., London, 204, 475-491.
- JOHNSTON, F.E. (1964)
The relationship of certain growth variables to chronological and skeletal age.
Hum. Biol., XXXVI, 16-27.
- * KUGELBERG, E. (1976)
Adaptive transformation of rat soleus motor units during growth.
J. Neurol. Sci., 27, 269-289.
- KUGELBERG, E. (1980)
Adaptive fibre and motor unit transformation in rat soleus during growth.
In "Plasticity of muscle", Pette D., De Gruyter W. et Co., Ed., Berlin-New-York, 111-117.
- LENSEL, G. (1978)
Etude et essai d'interprétation de la relation entre la compliance et la tension musculaire.
Thèse 3e cycle, Université de Lille I, 1 vol., 102 p.
- LIBERSON, W.T., DONDEY, M. et ASA, M.M. (1962)
Brief repeated isometric maximal exercises.
Amer. J. Phys. Med., U.S.A., 41, 3-14.
- LINDEGARD, B. (1953)
Variations in human body-build,
Acta Psychiat. Neurol., Copenhagen, suppl. 86.
- 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.
- MAC AULIFFE, L. (1923)
Developpement, croissance.
R. Legrand, Paris.
- * MAC CARTER, R. (1978)
Effect of age on contraction of mammalian skeletal muscle.
Aging, ed. G. Kaldor and W.J. Di Battista, Raven Press, New-York, 6, 1-21.
- MARECHAL, G. et CASTEELS, R. (1976)
Les muscles lisses de vertébré.
In C. Kaiser "Physiologie", vol. 2, Flammarion ed., Paris, 1715-1788.
- MARSHALL, W.A. (1966)
Assesment of skeletal maturity.
En J.J. Van Der Werf Ten Bosch et A. Haak ed., Somatic growth of the child, Proceeding of a Bocrhave course for postgraduate medical teaching, Leiden, Stenfert Kruese, 31-37.
- MARTIN, W.D. (1978)
Time course of change in soleus muscle fibers of rats subjected to chronic centrifugation.
Aviat. Space Environ. Med., 49 (6), 792-797.
- MATER, K. (1947)
Biometrical Genetics.
Dover, New-York, 158 p.
- MATON, B. (1975)
Etude périphérique de l'organisation du mouvement volontaire.
Thèse d'Etat, Université de Lille I, 1 vol., 214 p.
- MONOD, H. et SCHERRER, J. (1965)
The work capacity of a synergic muscle group.
Ergonomics, 8, 329-338.
- NADEAU, M., PERONNET, F. et coll. (1980)
Physiologie appliquée de l'activité physique.
Ed. Vigot, Paris, 1 vol. 285 p.
- O'BRIEN, R.A.D., ÖSTBERG, A.J. and VRBOVA, G. (1978)
Observations on the elimination of polyneuronal innervation in developing mammalian skeletal muscle.
J. Physiol., 282, 571-582.
- OLIVIER, G. (1961)
Morphologie et types humains.
Ed. Vigot Frères, Paris.

- PADIKULA, H.A. and GAUTHIER, G.F. (1970)
The ultrastructure of the neuromuscular junctions of mammalian red, white and intermediate skeletal muscle fibers.
J. Cell Biol., 46, 27-41.
- PATON, W.D.M. and WAUD, D.R. (1967)
The margin of safety of neuromuscular transmission.
J. Physiol., 191, 59-90.
- PERSON, R.S. and KUDINA, L.P. (1968)
Cross-correlation of electromyograms showing interference patterns.
Electroenceph. Clin. Neurophysiol., 25, 58-68.
- PERTUZON, E. (1972)
La contraction musculaire dans le mouvement volontaire maximal.
Thèse d'Etat, Université de Lille I, 1 vol., 208 p.
- PERTUZON, E. et BOUISSET, S. (1971)
Maximum velocity of movement and maximum velocity of muscle shortening.
Médecine and Sport, Biomechanics II, 6, 170-173.
- PERTUZON, E. et LESTIENNE, F. (1973)
Détermination dynamique de la position d'équilibre d'une articulation.
Int. Z. Angew. Physiol., 31, 315-325.
- RALSTON, H.J., INMAN, V.T., STAIT, L.A. and SHAFFRATH, M.D. (1947)
Mechanics of human isolated voluntary muscle.
Amer. J. Physiol., 151, 612-620.
- REDFERN, P.A. (1970)
Neuromuscular transmission in new-born rats.
J. Physiol., London, 209, 701-709.
- REITER, E.O. and ROOT, A. (1975)
Hormonal changes of adolescence.
Med. Clin. N. Am., 59, 1289.
- ROBBINS, W.J. (1928)
Growth, New Haven, Conn., Yale University Press.
- ROWE, R.W.D. (1967)
The post-natal growth and development of striated muscle in normal and dystrophic mice.
Ph. D. thesis, University of Hull, England.
- SAUVEGRAIN, J., NAHUM, A. et BRAUNSTEIN, H. (1962)
Etude de la maturation osseuse du coude. Son application à la détermination de l'âge osseux.
Ann. Radiol., 5, 542-550.
- SCHREIDER, E. (1956)
Morphologie et physiologie.
Bull. de l'Inst. Nat. d'Orientation Professionnelle, 12, 1-12.
- SEMPE, M. et PAVIA, C. (1979)
Atlas de la maturation squelettique.
S.I.M.E.P. S.A., Villeurbanne, 1 vol., 239 p.
- SEMPE, P. et SEMPE, M. (1971)
Croissance et maturation osseuse.
Theraplix, Paris.
- SHERRINGTON, C.S. (1925)
Remarks on some aspects of reflex inhibition.
Proc. Roy. Soc. B, 97, 519-541.
- SPEYER, B. (1950)
Betkenis en bepaling van de skeletleeftijd with a summary and atlas in english.
Leiden, Sijthoff.
- STICKLAND, N.C. and GOLDSPIK, G. (1973)
A possible indicator muscle for the fibre content and growth characteristics of porcine muscle.
Anim. Prod., 16, 135-146.
- TANNER, J.M. (1962)
Growth at adolescence.
Oxford, Blackwell Scientific Publications.

- TANNER, J.M. (1964)
Human growth and constitution.
En, G.A. Harrisson, J.M. Tanner, J.S. Weiner et N.A. Barnicot, Human biology, an introduction to the study of human variation and growth, Oxford, Clarendon, 295-397.
- TANNER, J.M., TAYLOR, G.R. et les rédacteurs des Editions Time-Life (1974)
La croissance.
Ed. Time-Life, 1 vol., 196 p.
- TANNER, J.M., WHITEHOUSE, R.H. et HEALY, M.J.R. (1962)
A new system for estimating skeletal maturity from the hand and wrist, with standards derived from a study of 2 600 healthy British children.
Part. II the scoring system, Paris, International Children's Centre.
- TABARY, J.C., TARDIEU, C., TARDIEU, G., TABARY, C. and GAGNARD, L. (1976)
Fonctionnal adaptation of sarcomere number of normal cat muscle.
J. Physiol., 72, 277-291.
- X TARDIEU, C., TABARY, J.C., GAGNARD, L., LOMBARD, M., TABARY, C. et TARDIEU, G. (1974)
Modification du nombre de sarcomères et de la tension tétanique isométrique après immobilisation à différentes longueurs du muscle tibial antérieur du Chat.
J. Physiol., 68, 205-218.
- X TARDIEU, C., TABARY, J.C., HUET DE LA TOUR, E., TABARY, C. and TARDIEU, G. (1977)
The relationship between sarcomere length in the soleus and tibialis anterior and the articular angle of the tibia calcaneum in cats during growth.
J. Anat., 124, 581-588.
- THEPAUT-MATHIEU, C. (1983)
Renforcement musculaire, étude de la spécificité angulaire d'un entraînement isométrique.
I.N.S.E.P., 11, av. du Tremblay, Paris 12e, 1 vol., 114 p.
- TODD, T.W. (1937)
Atlas of skeletal maturation, St-Louis, C.V., Mosby ed., 1 vol.
- X TOMKIEWICZ, S. (1974)
Le développement biologique de l'enfant.
Ed. P.U.F., 1 vol., 245 p.
- TRAVILL, A.A. (1962)
Electromyographic study of extensor apparatus of the forearm.
Anat. Rec., 144, 373-376.
- X VANDERVAEL, F. (1980)
Biométrie humaine, Masson, 3e ed., 164 p.
- VAN HOECKE, J., PEROT, C. et GOUBEL, F. (1980)
Evaluation du stockage d'énergie élastique au niveau du triceps sural.
5e Congrès de la Société de Biomécanique, Université de Bordeaux, in résumés des communications, 52-53.
- VIGREUX, B. (1977)
A propos de la détection de l'activité électromyographique de surface.
D.E.A., Université de Lille I, 1 vol., 41 p.
- VIGREUX, B. et PERTUZON, E. (1982)
Influence du niveau d'excitation sur la valeur de la compliance de la composante élastique-série du muscle humain in situ.
J. Biophys. Med. Nucl., 6 (5), 239-245.
- VON LANZ, T. und WACHSMUTH, W. (1959)
Praktische Anatomie, Arm zweite Auflage.
Eur. J. Physiol., 41, 119-129.
- WEINECK, J. (1983)
Manuel d'entraînement.
Vigot éd., Paris, 1 vol., 423 p.
- WELLS, J.B. (1965)
Comparison of mechanical properties between slow and fast mammalian muscles.
J. Physiol., London, 178, 252-269.
- X WILLIAMS, P.E. and GOLDSPIK, G. (1973)
The effect of immobilization on the longitudinal growth of striated muscle fibres.
J. Anat., 116, 45-55.

- WILKIE, B.R. (1950)
The relation between force and velocity in human muscle.
J. Physiol., London, 110, 249-280.
- WILKIE, D.R. (1956)
Measurements of the series elastic component at various times during a single muscle twitch.
J. Physiol., London, 134, 527-530.
- WONG, A.Y.K. (1971)
Mechanics of cardiac muscle based on Huxley's model : mathematical simulation of isometric contraction.
J. Biomechanics, 4, 529-540.
- WOODBURY, J.W., GORDON, A.M., CONRAD, J.J. (1965)
Muscle.
In Ruch and Patton, "Physiology and Biophysics", Saunders ed., London, 113-152.



DEVELOPPEMENT MUSCULAIRE ET CROISSANCE CHEZ
L'ENFANT ET L'ADOLESCENT : ETUDE BIOMECHANIQUE

:--:--:--:

Le développement moteur, au cours de la croissance, peut être étudié par la détermination des propriétés biomécaniques des muscles.

L'étude a porté sur des populations d'enfants et d'adolescents des deux sexes, réparties en quatre classes d'âge (enfants, pré-pubères, postpubères, jeunes). Les relations couple-angle, force-longueur et force-vitesse des fléchisseurs équivalents du coude ont été étudiées, sous contrôle électromyographique.

L'angle du couple maximum se déplace vers des positions articulaires d'extension au cours de la croissance. Il peut s'agir d'une modification de la géométrie musculo-squelettique des fléchisseurs due en particulier à la localisation des cartilages de croissance et/ou à une modification de la longueur fonctionnelle des muscles.

La croissance de la force évolue parallèlement chez les deux sexes, sauf à partir de la puberté où cette croissance devient nettement plus rapide chez les garçons.

Le développement de la vitesse de raccourcissement musculaire est plus précoce que celui de la force et est très marqué pendant la période prépubertaire. En fin de croissance, on note une légère diminution de la vitesse maximale de raccourcissement, peut-être due à une modification du type des unités motrices du muscle.

Compte tenu de cette cinétique du développement des propriétés mécaniques du muscle, il devrait être possible de mieux justifier le choix des types d'activités physiques et sportives en fonction de l'âge.

MOTS CLEFS

Biomécanique - Développement - Homme - Muscle strié - Contraction musculaire - Aptitude physique - Sexe.