

## MUSCLE AND SKELETAL SIZE AS A DETERMINANT OF STRENGTH

By Joseph Royce. *University of California, Berkeley* and David H. Clarke. *University of Maryland, College Park* — U. S. A.

### Introduction

Recently, the interest in the relationship between muscle size and strength has been revived. The writings of Hettinger <sup>(1)</sup> indicate that he considers the strength (per unit area of physiological cross section) to be constant at 4 kg/cm<sup>2</sup>. In other words, «it is the actual size of the muscle which determines its strength».

Several shortcomings in the development of the above argument should be pointed out.

The author measured the maximum strength of the intact muscle on men and women <sup>(2)</sup> and found that the latter group performed at 70 % of the male strength level. By measuring the diameter of the muscles with fat and skin subtracted (in this case the elbow flexors) it became clear that the female muscle diameters averaged at 70 % of the male diameters. This led to the above conclusion that strength is constant at 4 kg/cm<sup>2</sup> and is thus proportional to the size of the muscle.

Such a comparison of averages (70 % strength and 70 % diameter) without taking into account the variation around the mean and the individual's position in the rank-order of both measurements, is fallacious. The way to establish a relationship is by the calculation of a coefficient of correlation, using the individual scores, not just an

## LES DIMENSIONS DES MUSCLES ET DU SQUELETTE COMME DES DETERMINANTS DE LA FORCE

Par Joseph Royce. *University of California, Berkeley* et David H. Clarke. *University of Maryland, College Park* E. U. A.

### Introduction

L'intérêt sur le rapport entre la grosseur du muscle et sa force, s'est renouvelé récemment. Les écrits de Hettinger <sup>(1)</sup> montrent qu'il attribue une force constante de 4 kg/cm<sup>2</sup> de section transversale physiologique. En d'autres mots «c'est le volume réel du muscle qui détermine sa force».

Plusieurs insuffisances dans le développement de l'argument ci-dessus mentionné, doivent être indiquées.

L'auteur mesura la force maximum du muscle intact d'hommes et de femmes <sup>(2)</sup> et trouva que le dernier groupe atteignait 70 % du niveau de la force chez l'homme. En mesurant le diamètre des muscles (dans ce cas les fléchisseurs du coude), auxquels on a soustrait la graisse et la peau, il est devenu clair que les diamètres des muscles féminins étaient en moyenne 70 % des diamètres masculins. Ceci conduisit à la conclusion ci-dessus, que la force est constante de 4 kg/cm<sup>2</sup> et est donc proportionnelle à la grosseur du muscle.

Une telle comparaison de moyennes (pourcentage de 70 % pour la force et de 70 % pour le diamètre), sans prendre en considération la variation autour de la moyenne et la position de l'individu, dans le classement des deux mensurations, est trompeuse. La manière d'établir une relation, est de calculer un coefficient de corré-

average in both measures. When this is done, it is conceivable that a high correlation could result, especially if an experimental group contained subjects in a wide range of age. Elimination of the latter variable at the outset (by selection of a group of subjects of the same age) and actually correlating the strength and muscle size measurements, provides a different picture. Royce<sup>(3)</sup>, Smith<sup>(4)</sup>, and Smith and Royce<sup>(5)</sup> have, for instance, presented coefficients of correlation which demonstrate that muscle size is either unrelated to or unusable as a predictor of muscular strength. Since the circumference measurements which they used varied relatively little between subjects, it is conceivable that a higher correlation was masked.

In order to enlarge the above inter-individual variation, it may be possible to use limb volumes as an indication of muscle mass. The purpose of the present study, then, is to examine the relationship between a variety of hand and forearm structural components, and the maximum force of the handgrip muscles.

#### Method

Twenty-eight male college students, 18-22 years of age, who were enrolled in a weightlifting activities class twice a week were used as subjects. Their hand and arm volumes were obtained with a simple plethysmograph (water jacket type). The volume readings were obtained from a glass tube which was marked in millimeters (Fig. 1). Since the purpose of the study was to obtain intercorrelations, no conversion to actual volume was necessary.

Immersion up to the condyles of the radius and ulna provided the hand volume. For the hand-plus-arm volume they were immersed further into the plethysmograph up to the level of the medial and lateral epicondyles of the humerus. Accuracy was enhanced by marking the bony landmarks with tape, prior to the immersion.

lution, utilisant les résultats individuels, non pas une moyenne des deux mensurations. Cela fait, il est concevable qu'une corrélation élevée peut en résulter, spécialement si un groupe expérimental contient des sujets d'âges très différentes. L'élimination, au début, de la dernière variable (par la sélection d'un groupe de sujets du même âge) et en faisant la corrélation réelle des mensurations de la force et du volume musculaires, fournit un tableau différent. Royce<sup>(3)</sup>, Smith<sup>(4)</sup>, Smith et Royce<sup>(5)</sup> ont, par exemple, présenté des coefficients de corrélation qui démontrent que le volume musculaire, ou bien n'a pas aucun rapport, ou est non utilisable pour prédire la force musculaire. Puisque les mensurations des circonférences qu'ils ont employé, ont varié relativement peu parmi les sujets, il est concevable que la plus grande corrélation était cachée.

Pour élargir la variation interindividuelle ci-dessus, il est possible d'utiliser les volumes des membres comme indication de la masse musculaire. Le but de l'étude présente est donc d'examiner le rapport entre la variété des composants structurales de la main et de l'avant-bras et la force maximum des muscles de la préhension.

#### La méthode

Vingt-huit étudiants d'école supérieure, de 18-22 ans, auxquels on a demandé des activités de lever des poids, deux fois par semaine, ont été utilisés comme sujets. Les volumes de leurs mains et bras ont été obtenus avec un plethysmographe simple (du type «water jacket»). Les lectures des volumes étaient obtenues à l'aide d'un tube de verre marqué en millimètres (Fig. 1). Puisque le but de l'étude était d'obtenir des intercorrélations, aucune conversion au volume réel n'était nécessaire.

L'immersion jusqu'aux condyles du radius et du cubitus a fourni le volume de la main. Pour le volume de la main et du bras réunis, ils ont été immergés dans le plethysmographe jusqu'au niveau des épicondyles médiaux et latéraux de l'humérus. L'exactitude était augmentée en marquant les os avec un ruban, avant l'immersion.

Circumferences and lengths were obtained with anthropometric cloth tape. Width data were gathered by means of a sliding anthropometer. The wrist measurement was obtained at the widest bony point (condyles) of the distal end of the radius and

Les circonférences et les longueurs ont été obtenus avec un ruban anthropométrique de toile. Des données de largeur étaient réunies au moyen d'un anthropomètre mobile. La mesure du poignet fut obtenu à l'endroit osseux le plus large (condyles) de

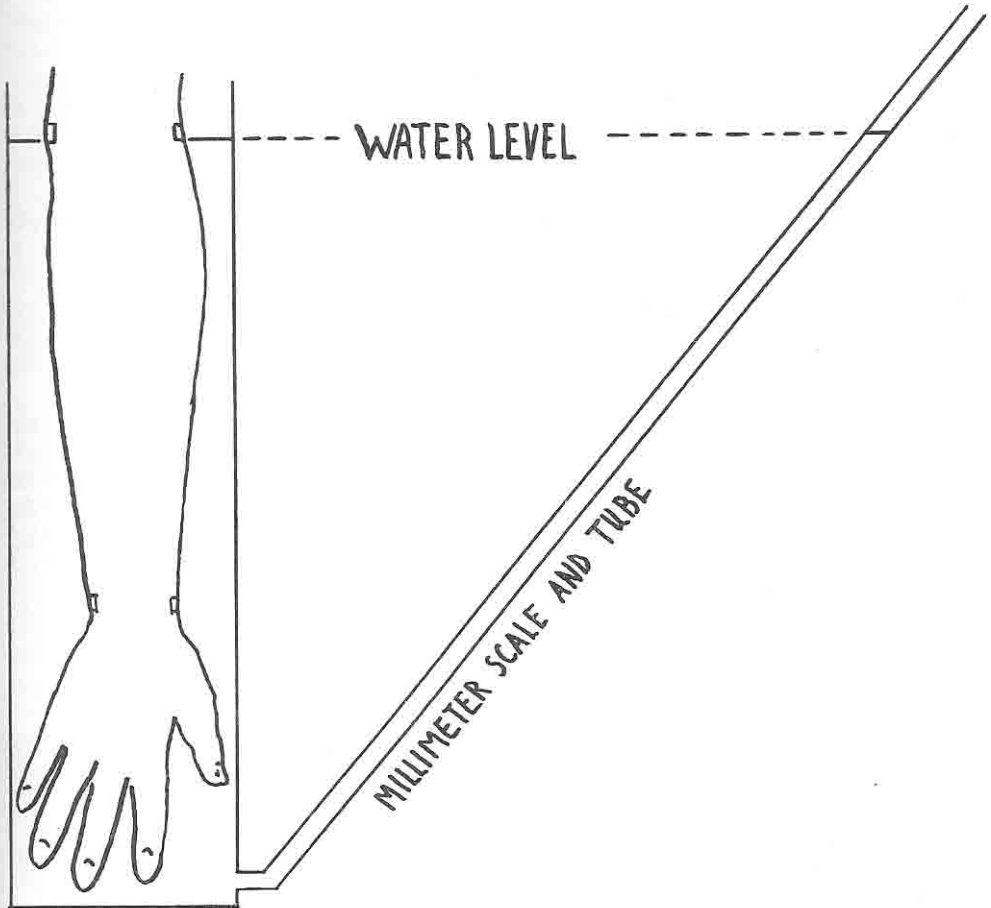


Fig. 1. Plethysmograph with tilted indicator tube. The hand and arm volumes were obtained by immersion up to the previously attached tape

Plethysmograph avec un tube indicateur incliné. Les volumes de la main et du bras ont été obtenus par leur immersion jusqu'au ruban attaché

ulna, the position of the forearm during this procedure being horizontal with hand palm upward and the upper arm held vertically at the side, causing a 90° angle at the elbow. Without changing the position, the elbow width was obtained by again measuring at the widest level (epicondyles) of the hume-

l'extrémité distale du radius et du cubitus, la position de l'avant bras pendant cette procédure étant horizontale, avec la paume de la main vers le haut et le bras maintenu verticalement et formant un angle de 90° au coude. Sans changer la position, la largeur du coude était obtenue en mesurant

rus. Care was taken that the anthropometer was kept horizontal during the reading.

Again, without changing the position of the forearm, the circumferences were obtained with the anthropometric tape applied with the least possible pressure. Forearm circumference was measured at the level of the greatest width of the muscle bulk as judged from the anterior side. The wrist circumference was measured at the smallest part of the wrist. Forearm length was obtained as the linear distance between the olecranon process and the tip of the middle finger.

The following force and fatigue measures were obtained on a separate day so as not to affect the above-described anthropometrical data.

A spring-loaded recording hand dynamometer was used to obtain a record of a statically-held maximal hand grip. Maximal force was measured from the kymograph record as the initial maximal height at the outset of effort.

All the measures were taken twice on both arms and categorized under the heading «preferred» or «non-preferred», rather than «left» or «right». The only difference in procedure between either side was that the static fatigue test lasted 30 seconds for the «preferred» hand and 45 seconds for the «non-preferred» hand.

The force was measured from the fatigue records every 5 seconds, thus yielding maximal strength and an additional 6 points on the preferred side (7 total) and 9 points on the non-preferred side (10 total).

In order to be able to compare the present data with the findings of Tuttle<sup>(6)</sup> it was decided to calculate the ratio between the mean force (for 7 and 10 points) of the fatigue curves and the maximal force according to the formula:

$$\frac{\text{Mean Force}}{\text{Maximal Force}}$$

de nouveau, au niveau le plus large (épi-condyles) de l'humerus. On était attentif à ce que l'anthropomètre était maintenu horizontal pendant la lecture.

Les circonférences étaient de nouveau obtenues avec le ruban anthropométrique appliqué avec la moindre pression possible, sans changer la position de l'avant bras. La circonférence de l'avant bras était mesurée au niveau de la plus grande largeur de la masse musculaire jugée par le côté antérieur. La circonférence du poignet était mesurée à l'endroit le plus mince du poignet. La longueur de l'avant bras fut obtenue par la distance linéaire entre l'olecrane et le bout du médus.

Les mesures de la force et de la fatigue qui s'ensuivit ont été obtenues en jours séparés, de façon à ne pas affecter les données anthropométriques ci-dessus décrites.

Un dynamomètre manuel enregistreur à ressort, fut utilisé pour obtenir l'enregistrement statistique de la préhension manuelle maximum. La force maximum a été mesurée d'après le registre kymographique comme étant la hauteur maximum au début de l'effort.

Toutes les mesures ont été prises deux fois aux deux bras et classées sous le titre «préféré» ou «non préféré» plutôt que «gauche» ou «droit». La seule différence dans la procédure, entre chacun des côtés, fut que le test de fatigue statique dura 30 secondes pour la main «préférée» et 45 secondes pour la main «non préférée».

La force a été mesurée chaque 5 secondes d'après les enregistrements de la fatigue, établissant ainsi la force maximum et 6 points additionnels du côté «préféré» (7 ou total) et 9 points dans le côté «non préféré» (10 au total).

De façon à être capable de comparer les données présentées avec les résultats obtenus par Tuttle<sup>(6)</sup>, il fut décidé de calculer le rapport entre la force moyenne (pour 7 et 10 points) des courbes de fatigue et la force maximum, selon la formule:

$$\frac{\text{Force moyenne}}{\text{Force maximum}}$$

## Results

The mean values of the above parameters were calculated on the basis of the average of repeated measurements and are presented in Table 1. It may be noted that the values are generally lower for the non-preferred hand. This is to be expected, as the non-preferred hand is generally weaker, less muscular, and smaller in circumference.

The values for mean force (item 10) cannot be compared in this manner, however, as the basis for calculation was different (30 and 45 seconds duration). The longer duration of the non-preferred contraction tends to depress the mean value, as the additional points thus obtained are lower than any previous ones.

### Reliability

The coefficients of test-retest reliability are presented in Table 2 (diagonally). In general (see preferred side), the anthropometrical measures show a high reliability ( $> .900$ ), with the exception of the width measurements (about  $.770$ ). The latter tendency has been observed before<sup>(3)</sup> and may have its roots in the rather narrow range of scores usually obtained for such small bony widths. The influence of any measurement error is thus exaggerated. Reliability figures on maximal force (item 9) and mean force (item 10) show a moderate correlation.

### Intercorrelations

#### a. *Anthropometrical measurements.*

Viewing the intercorrelation matrix (Table 2), it becomes clear that there exists no relationship between the present length and circumference measurements (item 1 vs. 2 and 3). The correlations between the width, circumference and length items are rather low (items 4 and 5 vs. 1, 2, 3), with the possible exception of the wrist width and wrist circumference intercorrelation.

## Résultats

Les valeurs moyennes des paramètres ci-dessus ont été calculées sur la base de la moyenne de mesures répétées et sont présentées au Tableau 1. On peut remarquer que les valeurs sont généralement plus bas pour la main «non préférée». Ceci était à prévoir vu que la main «non préférée» est généralement plus faible, moins musclée et de circonférence plus petite.

Les valeurs de la «force moyenne» (item 10) ne peuvent pas cependant être comparées de cette façon, car la base pour le calcul était différent (30 et 45 secondes de durée). La durée la plus longue de la contraction «non préférée» tend à abaisser la «valeur moyenne», les points additionnels ainsi obtenus, étant inférieurs à chacun des antérieurs.

### Dégré de confiance

Les coefficients du degré de confiance dans les testabilité et retestabilité sont présentés dans la Tableau 2 (diagonalement). En général (voir le «côté préféré») les mesures anthropométriques montrent un grand degré de confiance ( $> .900$ ) à l'exception des mesures en largeur (environ  $.700$ ). La dernière tendance a été observée antérieurement<sup>(3)</sup> et peut avoir plutôt ses origines dans l'étroite rangée des marques habituellement obtenues pour de telles petites largeurs osseuses. L'influence de toute erreur de mesure est ainsi exagérée. Le degré de confiance des chiffres de la «force maximum» (item 9) et de la «force moyenne» (item 10) montrent une corrélation modérée.

### Intercorrélations

#### a. *Mesures anthropométriques.*

Regardant la matrice des intercorrélations (Tableau 2) il devient clair qu'il n'existe aucune relation entre la longueur réelle et les mesures de circonférence (items 1 vs. 2 et 3). Les corrélations entre les largeurs, les circonférences et les longueurs sont plutôt basses (items 4 et 5, vs. 1, 2, 3) avec l'exception possible de la largeur et l'intercorrélations circonférentielle du poignet.

Table  
Tableau 1

Means and standard deviations for the experimental variables of preferred and non preferred Arms

Déviations moyennes et étalonnées des variables expérimentales des bras « préférés » et « non préférés »

	Preferred Arm Bras préféré		Non Preferred Arm Bras non préféré		
	M	SD	M	SD	
Forearm Length (cm.)	47.45	4.26	47.30	4.08	Longueur de l'avant-bras (cm.)
Forearm Circumference (cm.)	27.75	2.73	27.21	2.81	Circ. de l'avant-bras (cm.)
Wrist Circumference (cm.)	17.57	1.42	17.43	1.34	Circ. du poignet (cm.)
Wrist Width (cm.)	5.65	.571	5.56	.562	Largeur du poignet (cm.)
Elbow Width (cm.)	7.05	.547	6.99	.543	Largeur du coude (cm.)
Hand Volume (cm.)*	9.94	2.07	9.51	2.02	Volume de la main (cm.)*
Arm Volume (cm.)*	26.14	6.30	24.47	4.68	Volume du bras (cm.)*
Hand-plus-Arm Volume (cm.)*	35.93	7.79	34.30	7.70	Volume de la main plus le bras (cm.)*
Maximum Force (kg.)	44.14	9.11	40.51	9.47	Force maximum (kg.)
Mean Force (kg.)*	38.46	9.80	31.86	10.85	Force moyenne (kg.)*
Ratio ( $\frac{\text{Mean Force}}{\text{Maximum Force}}$ )	.87	.11	.78	.14	Rapport ( $\frac{\text{Force moyenne}}{\text{Force maximum}}$ )

\*See text for interpretation of measurement value

\*Voir le texte pour l'interprétation de la mesure des valeurs

Non preferred arm\*  
Bras non préféré\*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Forearm Length	.976	-.129	-.044	.610	.128	.250	.068	.250	.113	.007	.112	Longueur de l'avant-bras
Forearm Cir.		.875	.728	.258	.343	.703	.602	.611	.608	.563	.324	Cir. de l'avant-bras
Wrist Cir.			.831	.441	.456	.149	.649	.582	.442	.343	.106	Cir. du poignet
Wrist Width				.738	.681	.420	.329	.503	.158	.432	.388	Largeur du poignet
Elbow Width					.821	.440	.442	.556	.367	.372	.266	Largeur du coude
Hand Volume						.888	.599	.213	.237	.234	.264	Volume de la main
Arm Volume							.930	.922	.495	.517	.370	Volume du bras
Hand-Arm Volume								.950	.557	.531	.315	Volume de la main et du bras
Max. Force									.613	.783	.389	Force maximum
Mean Force										.727	.771	Force moyenne
Ratio											.775	Rapport

\*  $r > .374$  is statistically significant

\*  $r > .374$  est statistiquement significatif

Table 2  
Tableau

MATRIX OF INTERCORRELATIONS

	Preferred arm * Bas préféré *											
	N = 28											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Forearm Length	.937	-.234	.024	.530	.381	.234	.138	.212	-.193	-.168	-.093	Longueur de l'avant-bras
Forearm Cir.		.939	.520	.415	.137	.547	.646	.573	.434	.402	.223	Cir. de l'avant-bras
Wrist Cir.			.912	.618	.541	.119	.722	.747	.585	.318	.033	Cir. du poignet
Wrist Width				.783	.777	.635	.592	.643	.349	.381	.148	Largeur du poignet
Elbow Width					.750	.434	.551	.559	.411	.420	.176	Largeur du coude
Hand Volume						.805	.701	.119	.384	.341	.083	Volume de la main
Arm Volume							.939	.948	.476	.582	.216	Volume du bras
Hand-Arm Volume								.952	.438	.428	.243	Volume de la main et du bras
Max. Force									.732	.816	.161	Force maximum
Mean Force										.771	.661	Force moyenne
Ratio											.530	Rapport

\*  $r > .374$  is statistically significant

\*  $r > .374$  est statistiquement significatif



The latter is to be expected as one measure is partially incorporated in the other.

A look at the volume parameters (items 6-8) shows that they are not related to the length measurements. Moderate correlations were found, however, with the circumference measurements (items 2 and 3,  $r=.547 - .747$ ) and the width measurements (items 4 and 5,  $r=.434 - .643$ ). Among the volume parameters the hand volume was correlated .701 with the arm volume, but lacked relation with the arm plus hand parameter ( $r=.119$ ). The latter item correlates .948 with arm volume. An explanation of the above absence of a relation between hand and hand plus arm volume, must be sought in the fact that the former constitutes such a small part of the whole as to become insignificant

#### b. *Force measurements.*

Except for the correlation between the maximal force (item 9) and mean force (item 10) which is moderately high (.816), a general low to moderate relationship can be perceived. The above high correlation may be due to a part-whole spurious relation. Among the other correlations the highest one found amounted to .585 (wrist circumference vs. maximal force), which gives  $r^2=.342$ . Interpreted as amount of non-relationship ( $K^2$  is  $1,000-.342=.658$ ) we see a 66% lack of common variance. Further analysis would reveal even greater specificity, as the other correlations are even lower

#### c. *Force vs. Anthropometrical measurements.*

Contrary to popular belief, no relationship high enough for predictive purposes can be found between structural (muscle and bone size) and functional (strength) parameters. These findings do not stand alone. Studies by Royce<sup>(3)</sup> and Smith and Royce<sup>(5)</sup> show the same lack of relation-

La dernière serait une mesure partiellement incorporée dans l'autre.

Un regard aux paramètres de volume (items 6-8) montre qu'ils ne sont pas en rapport avec les mesures de longueur. Des corrélations modérées ont été cependant trouvées avec les mesures de circonférence (items 2 et 3,  $r=.547 - .747$ ) et les mesures de largeur (items 4 et 5,  $r=.434 - .643$ ). Parmi les paramètres de volume, le volume de la main était en corrélation .701 avec la volume du bras, mais il n'était pas en relation avec le bras plus le paramètre de la main ( $r=.119$ ). Le dernier est en corrélation .948 avec le volume du bras. Une explication de l'absence ci-dessus de relation entre le volume de la main et le volume de la main plus le bras, doit être cherché dans le fait que le premier constitue une telle petite partie du tout qu'il devient insignifiant.

#### b. *Mesure de la force*

Excepté pour la corrélation entre la «force maximum» (item 9) et la «force moyenne» (item 10), qui est modérément haute (.816), une relation qui va de basse à modérée peut être perçue. La haute corrélation ci-dessus peut être due à une relation partiellement fautive. Parmi les autres corrélations, celle qui a été trouvée être la plus haute, montait à .585 (circonférence du poignet vs. la force maximum) ce qui donne  $r^2=.342$ . Interprétée comme le total de la non-relativité ( $K^2$  est  $1,000 - .342=.658$ ) nous voyons qu'il manque 66% à la variation commune. Une analyse ultérieure révélerait une spécificité encore plus grande, vu que les autres corrélations sont encore inférieures.

#### c. *Force vs. Mesures anthropométriques.*

Contrairement à la croyance populaire, on ne peut pas trouver aucune relation suffisamment grande, en vue d'objectifs prévus, entre paramètres structuraux (volume des muscles et des os) et fonctionnels (force). Cette découverte n'est pas isolée. Des études de Royce<sup>(3)</sup> et de Smith et

ship. The earlier statement by Hettinger <sup>(1)</sup> must be viewed with caution since no sufficient treatment of the data was provided to support them.

This lack of relationship may find its explanation in the view that «strength» (as expressed in our maximum force and mean force) is a matter of motor coordination, controlled by motor cortical activities rather than a matter of muscle size (size of muscle fibers, or engorgement with fluids or whatever is thought to make up its bulk).

It should also be kept in mind that the above low relationship improves considerably when the range in a third and contributory factor is expanded. For instance, if data had been collected on 10 to 26-year-old males, we would have expected a high relationship between function and structure as defined above, due to the factor of physical maturation.

#### Conclusions

The following conclusions seem warranted:

1. Skeletal length, width and circumferential measures are unrelated.
2. Muscle and skeletal size do not predict an individual's strength capability.

Royce <sup>(5)</sup> montrent la même absence de relation. L'affirmation précédente de Hettinger <sup>(1)</sup> doit être considérée avec prudence puisque aucune appréciation suffisante des données n'a été fournie pour l'appuyer.

Ce manque de relation peut trouver son explication dans l'opinion que la «force» (exprimée en force maximum et en force moyenne) est un affaire de coordination motrice contrôlée par des activités corticales plutôt qu'une question de volume musculaire (volume des fibres musculaires, ou engorgement avec des fluides or quoi que ce soit qu'on pense dont la masse est faite.

On ne doit pas oublier que la faible relation ci-dessus mentionnée est considérablement améliorée quand l'étendue d'un troisième facteur contributif est augmentée. Par exemple si les données ont été recueillies chez des sujets masculins de 10-26 ans, nous attendrions une relation plus grande entre la fonction et la structure, comme nous l'avons déjà défini, en raison du facteur maturité physique.

#### Conclusions

Les conclusions suivantes paraissent être autorisées:

1. La longueur, la largeur et les circonférences du squelette ne sont pas en relation entre eux.
2. Le volume des muscles et du squelette ne fait pas prévoir la capacité de la force individuelle.

#### REFERENCES

1. Hettinger, T., *Physiology of Strength*, Springfield, 111., Charles C. Thomas, 1961, p. 12.
2. Hettinger T., Die Muskelkraft bei Frauen und Männern, *Zentralblatt für Arbeitswissenschaft*, 14:79-84, 1960.
3. Royce, J., Use of Body Components as Reference Standards for Basal Metabolic Rate, *Res. Quart.* 29:60-73, 1958.
4. Smith, L. E., Individual Differences in Strength, Reaction, Latency, Mass and Length of Limbs, and Their Relation to Maximal Speed of Movement, *Res. Quart.* 32:208-221, 1961.
5. Smith, L. E. and Royce, J., Muscular Strength in Relation to Body Composition, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 110, Part II: 809-813, 1963.
6. Tuttle, W. W., Janney, C. D., and Thompson, C. W., «Relation of Maximum Grip Strength to Grip Strength to Grip Strength Endurance», *J. Appl. Physiol.*, 2:663-670, 1950.