

Les Caractéristiques Morphologiques, Chimiques et Physiques des côtes  
et leurs relations avec la déflexion provoquée du thorax

Claude GOT

Service d'Anatomie Pathologique - IRO - Hopital R.Poincaré 92 GARCHES - FRANCE

G. WALFISCH, A.FAYON et G. FAVERJON.

Laboratoire de Physiologie et de Biomécanique de l'Association Peugeot-Renault  
PARIS.

L'utilisation expérimentale de cadavres pour l'étude des lésions thoraciques provoquées par les moyens de retenue, est actuellement limitée par les variations importantes qui existent d'un individu à l'autre.

Ces différences apparaissaient déjà évidentes lors d'enquêtes portant sur des accidents réels au cours desquels les occupants étaient lésés par leur ceinture. Le seuil d'apparition des fractures de côtes, l'estimation de l'effort de retenue exercé par le baudrier sur la cage thoracique variant dans une proportion de 1 à 3 pour les valeurs extrêmes. Les mesures de ces efforts au cours d'expérimentation utilisant des cadavres frais ont confirmé ces grandes variations qui apparaissent aussi bien sur les courbes dynamiques exprimant la déflexion du thorax au cours d'un choc que dans la mesure des seuils à partir desquels apparaissent des lésions. (Ref. 1 à 7).

Il apparait donc indispensable, si l'on veut utiliser de façon comparative ces essais sur les cadavres frais, de connaître les caractéristiques biomécaniques de leur thorax. Dans ce but nous avons réuni un certain nombre de données morphologiques et biomécaniques et étudié les corrélations existant entre elles.

#### MATERIEL ET METHODES

L'étude a porté sur 34 cadavres non embaumés dont le sexe, la taille, le poids et l'âge sont précisés dans les tableaux annexes. Les diamètres antéro-postérieurs et transversaux du thorax ont été mesurés au niveau du 4<sup>ème</sup> arc costal.

Chez 20 sujets, une compression statique antéro-postérieure du thorax a été réalisée en décubitus dorsal, par l'intermédiaire d'un disque de 15,2 cm de diamètre, un dynamomètre indiquant l'effort exercé pour produire une déflexion allant de 0 à 30 mm (les valeurs intermédiaires étant relevées tous les 3,5 mm).

14 fois, la compression était réalisée par une ceinture de sécurité à 3 points de fixation, 6 fois au cours d'expérimentation statique, 8 fois en reproduisant les circonstances d'un choc accidentel, la déflexion thoracique étant l'objet d'un enregistrement optique.

Dans tous les cas, une trachéotomie était réalisée avant la compression.

Au cours de l'autopsie qui a suivi ces expérimentations l'état des côtes était vérifié et les 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> arcs costaux prélevés.

Un fragment de l'arc antérieur des 4<sup>ème</sup> côtes a été pesé à l'état frais puis calciné à 700 ° C pendant 15 minutes pour établir la proportion de sels minéraux. Le fragment de côte adjacent a été fixé dans le formol à 10 %, déminéralisé puis préparé suivant les techniques histologiques habitu-

elles pour obtenir des préparations microscopiques de sections transversales de 10 microns d'épaisseur, colorées par l'Hématéine, la Phloxine et le safran. Ces côtes ont été mesurées (largeur et épaisseur), la technique de préparation provoque une rétraction d'environ 12 % sur la plus grande dimension de la section et de 17 % sur la plus faible. La surface de la corticale osseuse, et la surface totale de la section de côte ont été mesurées par pesée d'un calque après un agrandissement de 15 fois. La proportion de tissu osseux dans la médullaire a été déterminée en utilisant un oculaire intégrateur Zeiss Kpl 1. La surface s correspond à la somme des surfaces de l'os cortical et des lamelles de l'os spongieux sur les sections de côtes.

La 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> côtes droites et gauches ont été utilisées pour les essais mécaniques, dans ce but un segment de 80 mm a été prélevé dans la zone la plus rectiligne de leur arc moyen.

Les essais statiques comportent un essai de flexion sur appui et un essai de cisaillement.

L'essai de flexion statique est effectué sur machine Instron avec un seul poussoir à mi distance des 2 appuis sur lesquels l'élément de côte repose. Le poussoir et les appuis sont cylindriques du rayon 15mm dans leurs parties au contact avec la côte; les points de contact initiaux de la côte sur les 2 appuis sont séparés de 60 mm.

En dynamique la même géométrie est conservée. L'énergie provient de la chute du poussoir, équipé d'un accéléromètre et pesant au total 240 g.

Avec une hauteur de chute de 0,5 m des résultats satisfaisants ont été obtenus.

Le cisaillement est réalisé par un couteau parallélépipédique dont les plans de coupe sont distants de 10 mm.

## RESULTATS

Les expérimentations précédemment décrites ont permis d'établir les tableaux I et II qui font le bilan des résultats bruts. Symboles et unités utilisés sont reportés dans le tableau III.

A ce stade nous avons effectué une recherche systématique des corrélations susceptibles d'exister entre les différents paramètres des tableaux, afin d'en dégager les plus significatifs, en nombre aussi restreint que possible, pour caractériser l'état osseux d'un sujet.

### I Caractéristiques dimensionnelles de la section et minéralisation.

La surface d'os compact et le taux de sels minéraux par unité de longueur de côte sont fortement corrélés, ( $r = 0,87$ ) ce qui exprime que le pourcentage de sels calciques dans un volume d'os compact donné ne varie que peu avec l'âge et le sujet, autrement dit, les sujets deviennent ostéoporotiques avec l'âge mais sans ostéomalacie.

De même s/S et C/M sont très liés ( $r = 0,85$ ).

Cette relation a pratiquement la même signification que la précédente, compte tenu du fait que la surface S, est la somme de la surface de l'os et de celle des tissus mous, C est celle des sels minéraux dans l'os et M la somme de la masse de ces sels minéraux et de la masse de substances volatilisées lors de la calcination, essentiellement l'eau contenue dans les parties molles et dans l'os compact.

## II Essais mécaniques

Les essais de flexion statiques permettent de déterminer E (module d'élasticité) et la contrainte à la rupture  $\sigma$ . Ces deux paramètres ne sont pratiquement pas reliés aux autres cependant  $\sigma$  et l'âge du sujet semblent avoir quelque rapport ( $r = -0,55$ ).

- a) la raideur statique initiale (phase élastique) est bien corrélée à C/L (0,64), s (0,62), C/L x épaisseur de la côte (0,67)

L'effort maximum atteint en essai de flexion statique est également bien corrélé à C/L (0,66) et C/L x épaisseur de la côte (0,71)

En essai de flexion dynamique, nous trouvons que C/L est bien corrélé avec l'effort maximum (0,69), l'effort maximum que divise la flèche à la rupture (0,73)

- b) Cisaillement. Nous avons trouvé les meilleures corrélations en exploitant les essais de cisaillement.

L'énergie fournie pendant l'essai de cisaillement est bien corrélée avec C/M (0,754), C/L (0,7), s/S (0,67) et surtout C/L x épaisseur de la côte: (0,83)

## III Essai de compression statique du thorax

La raideur du thorax à la compression par un disque plan, multipliée par son épaisseur, est très bien corrélée (0,715) avec s/S d'une part, et également bien corrélée avec l'effort maximum de cisaillement de la côte expérimentée ( $r = 0,749$ ).

### COMMENTAIRES

La multiplicité des paramètres étudiés rendra indispensable une analyse dimensionnelle permettant de faire intervenir chacun d'entre eux avec l'importance qui lui est propre, dans la caractérisation mécanique d'un thorax humain. Dès maintenant l'étude plus élémentaire des coefficients de corrélation qui existent entre ces différents paramètres, permet d'observer des valeurs suffisamment élevées pour que l'on puisse insister sur l'intérêt :

- des caractères morphologiques du thorax et des côtes
- de la proportion des sels minéraux par rapport à la masse de côtes fraîches
- de l'étude des caractéristiques mécaniques des côtes isolées.

Il faut également remarquer que les méthodes de mesure utilisées peuvent être mieux adaptées au but recherché, en particulier il serait souhaitable que l'étude morphométrique de la section de côte porte sur la zone de rupture provoquée lors des essais statiques et dynamiques.

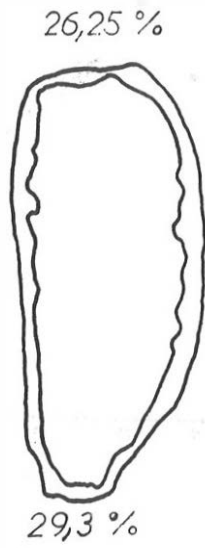
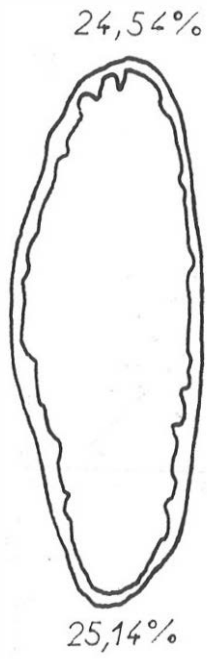
L'âge des sujets est médiocrement corrélé avec l'ensemble des paramètres étudiés,  $r$  atteint cependant -0,55 quand on compare l'âge et le rapport s/S, et surtout -0,67 avec l'énergie fournie lors de l'essai de cisaillement

L'âge seul apparaît donc comme un paramètre insuffisant pour caractériser le comportement d'un thorax.

Bien entendu l'étape ultérieure de notre recherche sera la comparaison des sollicitations dynamiques du thorax et des fractures de côtes observées expérimentalement aux paramètres précédemment décrits. Les corrélations observées pourront alors servir de base à une étude comparative des moyens de retenue utilisés dans les véhicules, par exemple pour déterminer la largeur optimale d'un baudrier de ceinture 3 points, ou la meilleure disposition des points d'ancrage.

#### BIBLIOGRAPHIE.

1. C.K. KROELL, D.C. SCHNEIDER et A.M. NAHUM  
Impact tolerance and response of the human thorax.  
Proceedings of eighteenth Stapp Car Crash Conference, p. 383-457.  
Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale, 1974.
2. G. SCHMIDT, D. KALLIERIS, J. BARZ et R. MATTERN  
Result of 49 Cadavers Tests simulating frontal collision of front seat passengers. Idem, p. 283-291.
3. R.L. STANALKER, J.H. McELHANEY, V.L. ROBERTS, and M.L. TROLLOPE  
"Human Torso Response to Blunt Trauma."  
Human Impact Response, New York : Plenum Press, 1973.
4. G. GRANIK et I. STEIN  
Human ribs : static testing as a promising medical application.  
J. Biomechanics, 1973, Vol 6, p. 237-240.
5. A. FAYON, C. TARRIERE, G. WALFISCH, C. GOT et A. PATEL  
Thorax of 3 points belt wearers during crash  
Proceedings of the 19 th Stapp Car Crash Conference  
Society of Automotive Engineers, Inc., 1975.
6. A. FAYON, C. TARRIERE, G. WALFISCH, C. GOT et A. PATEL  
Synthèse des résultats et conclusions d'une série d'essais de ceintures de sécurité retenant des cadavres  
Proceedings of the 3 rd IRCOBI Conference, Birmingham, 1975.
7. M. THEIS  
Untersuchung der dynamischen und statischen biegebelastung frischer menschlicher Rippen in Abhängigkeit zu Alter und geschlecht.  
Institut für gerichtlichen Medizin, Heidelberg, 1975.



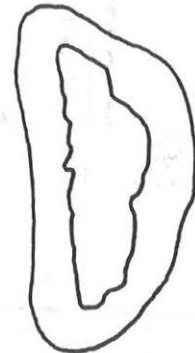
$$\frac{\text{surface osseuse}}{\text{surface totale}} \times 100$$

45,35%

64,11%

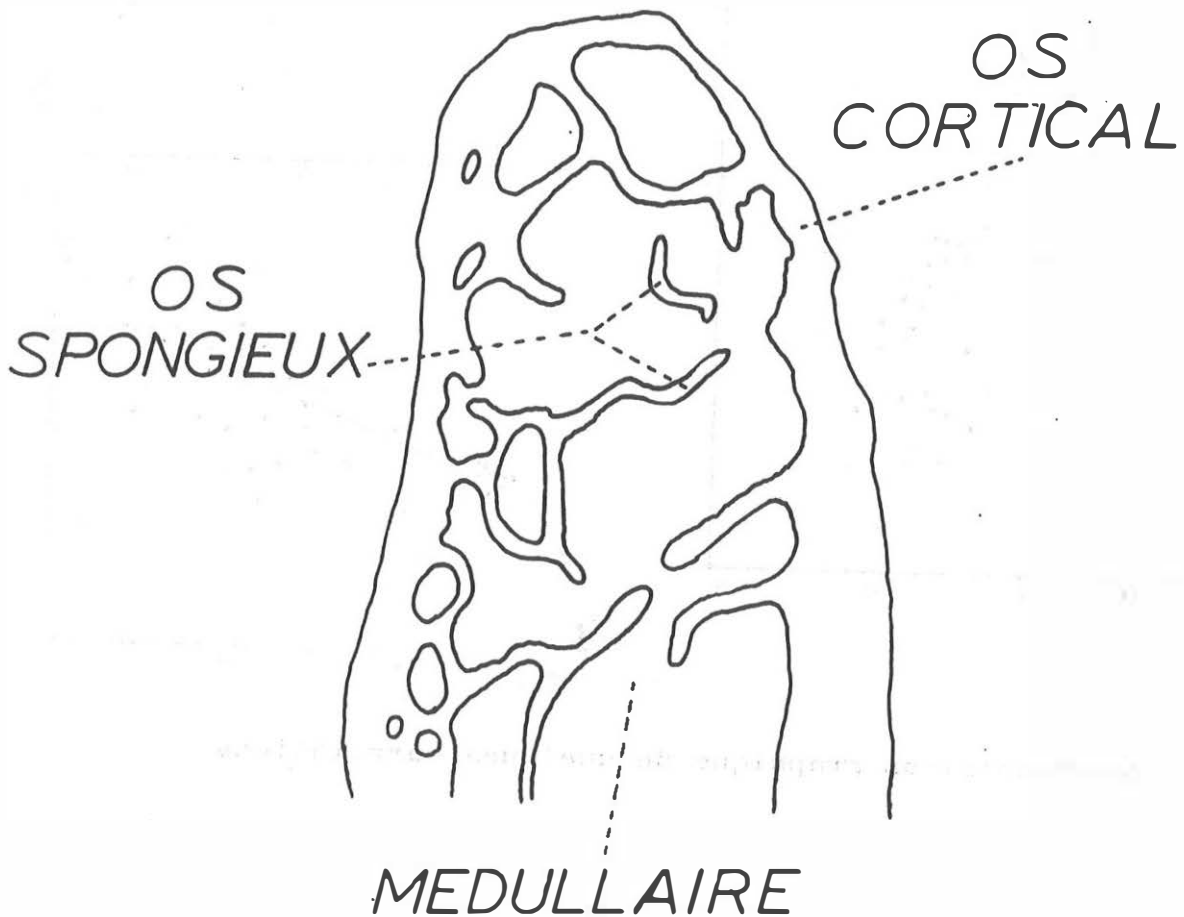


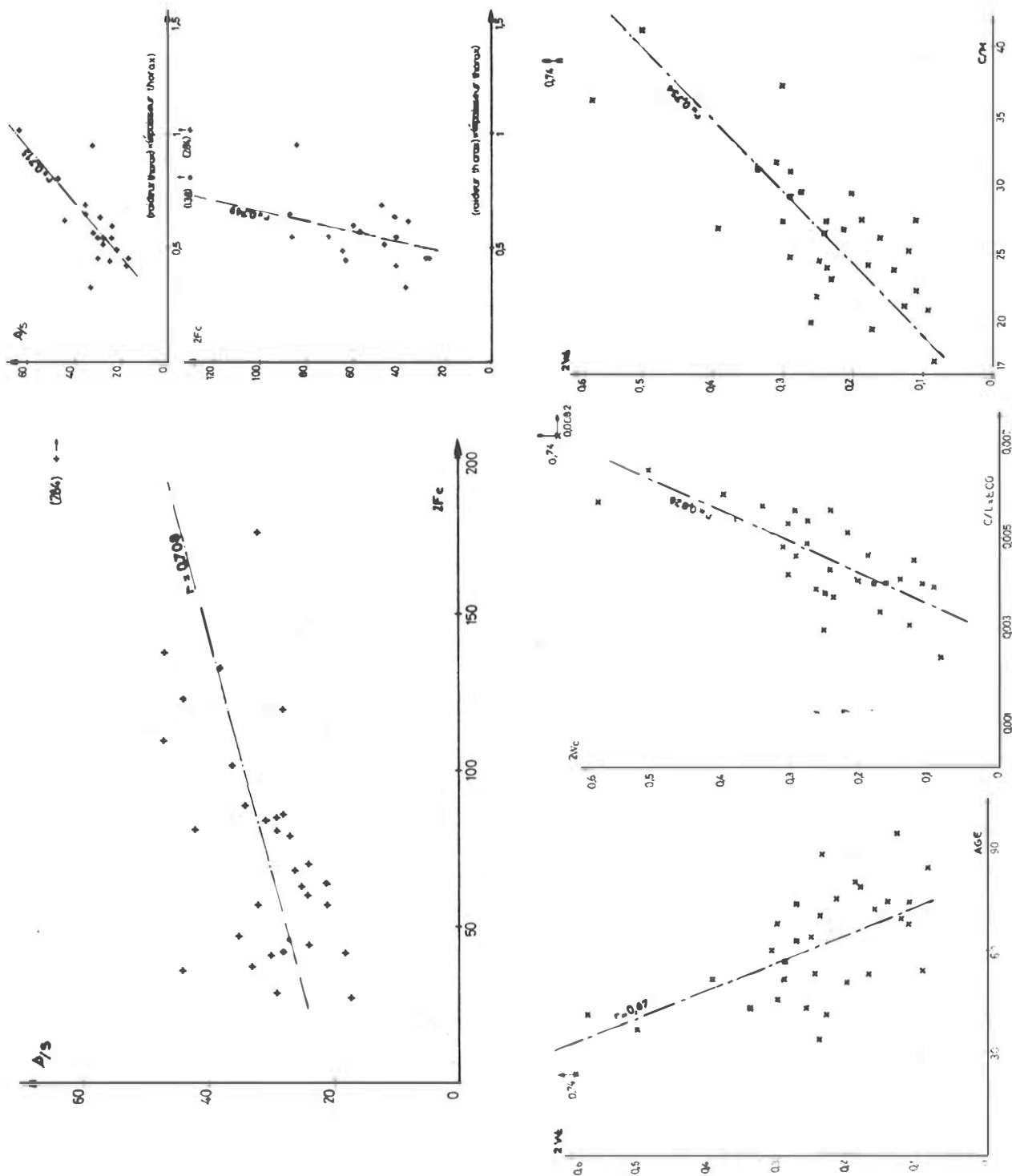
36,4%



41,12%

$$\frac{\text{poids des cendres}}{\text{poids d os frais}} \times 100$$





Représentation graphique de quelques corrélations.

N°	TABLEAU I				D	E	F	G	H	Dimensions thorax (cm)		Dimensions côtes (mm)		Section côtes		Minéralisation côtes	
	1	2	3	4						CTH	ETH	ECO	ECO	s	s/S	(%)	(%)
11	41	M	168	62.5	92	21	10.73	5.44	20.34	31.68	23.77	.30	1.00				
12	74	M	170	61.5	88	21.5	13.16	4.50	20.80	30.02	22.21	.24	0.90				
13	58	M	189	85.5	100.5	24	14.40	6.06	27.40	28.34	24.85	.33	0.90				
14	74	M	177	89.5	108	27	15.20	5.90	25.81	27.62	23.87	.23	1.19				
15	52	F	168	50			9.47	5.80	28.73	47.28	31.60	.16	0.92				
16	51	M	176	59	92	23	9.60	5.60	19.29	32.02	29.50	.24	0.91				
17	54	F	168	39	75	20.5	14.20	4.16	17.44	33.14	21.14	.12	1.13				
18	80	M	175	52	83	21	12.67	5.13	25.86	35.09	27.49	.23	1.32				
19	84	F	148	44	80	20	12.07	4.76	10.33	16.97	17.20	.38	0.97				
20	88	M	163	50	91	23	13.20	6.17	17.33	24.53	24.10	.22	1.39				
21	24	M	188	67.5	89	21	10.30	4.60	25.04	44.48	37.47	.12	1.22				
22	68	M	163	68.5	102	25.5	13.43	5.66	23.18	28.97	27.70	.16	1.09				
23	69	M	176	50.5	86	19.5	12.36	4.90	16.08	24.15	25.30	.22	1.31				
25	72	M	168	36	73	20	9.46	2.86	9.48	29.76	26.23	.15	1.14				
26	51	F	156	51.5	88	21	9.13	3.00	14.53	47.14	37.34	.21	1.00				
27	73	M	170	74.5	99	25.5	12.40	4.56	16.83	25.44	28.89	.20	1.11				
28	94	M	180		82	20	13.43	5.00	13.55	18.30	21.20	.29	0.81				
29	75	M	175	55	89	22	12.83	4.03	21.31	34.54	26.91	.39	1.03				
30	79	M	174	52	91	26	14.80	5.03	18.26	21.78	24.26	.17	1.04				
31	37	F	160	56	82	20	11.35	4.43	35.96	64.10	41.32	.08	0.95				
33	51	M	177	50	79.5	18	10.67	6.47	37.46	42.35	26.82	.29	1.07				
34	57	M	164	68	86.5	22	11.33	5.00	16.53	25.91	22.85	.20	1.10				
35	59	F	158	60	85.7	19.5	7.67	4.40	8.79	22.45	18.50	.22	0.97				
41	60	M	171	50			11.50	6.16	24.07	32.55	31.67	.19	1.01				
42	43	M	159	50	70	19	14.83	5.00	17.74	21.33	20.20	.18	1.04				
43	53	M	172	65	80	21	11.83	5.83	22.82	28.75	24.52	.31	1.01				
44	53	M	174	65.5	88	21	12.33	5.66	18.94	24.95	19.60	.32	1.42				
47	64	M	171	64	89.8	22	10.66	5.83	17.00	26.28	21.80	.25	1.10				
48	42	M	167	75	95	23	13.16	5.33	30.96	44.29	36.16	.19	1.01				
50	70	M	184	77	105	25	13.83	5.67	22.41	26.94	27.30	.18	1.04				
51	63	M	175	61	88	22.5	12.40	4.57	22.30	35.72	32.30	.31	1.01				
52	43	M	174	63	89	22	14.66	4.16	23.29	38.70	31.30	.24	1.02				
53	46	M	165	63	94	22	13.00	5.34	21.31	27.47	27.70	.23	1.07				
54	34	M	178	60	88	22	14.23	5.33	24.49	34.54	26.74	.23	0.95				

- TABLEAU II -

N°	Flexion dynamique		Flexion statique				I <sub>yy</sub> (mm <sup>4</sup> )	E (daN/mm <sup>2</sup> )	$\sqrt{\quad}$ (daN/mm <sup>2</sup> )	Cisaillem. statique		Raideur thorax $\Delta F/\Delta \delta$	
	F <sub>d</sub> (daN)	d (mm)	W <sub>d</sub> (J)	F <sub>f</sub> (daN)	f (mm)	W <sub>f</sub> (J)				AF/ $\Delta \delta$ (daN/mm)	2F <sub>c</sub> (daN)		2W <sub>c</sub> (J)
11	8.18	5.00	.12	27.2	6.45	.97	20.00	39.54	904.0	16.23	84.0	2.29	20.0
12	13.35	5.00	.31	10.6	7.20	.56	10.39	77.02	607.0	7.00	41.0	1.11	11.9
13	16.40	6.75	.53	16.3	9.60	1.03	14.12	195.94	324.2	4.79	86.0	2.90	13.3
14	7.43	4.80	.17	12.7	1.60	.12	11.36	163.16	313.3	3.92	46.5	1.39	14.2
15	7.40	3.00	.08	12.8	8.60	.79	13.19	161.96	366.5	3.98	110.0	2.91	13.3
16	8.55	3.80	.13	19.5	2.22	.26	11.76	78.60	373.3	11.31	57.5	2.09	13.2
17	5.86	4.25	.07	14.0	1.70	.12	8.70	29.22	1342.0	18.93	37.0	.91	6.7
18	6.69	3.80	.10	17.0	7.30	.89	14.58	99.54	659.1	7.17	47.0	1.86	14.6
19	4.46	5.40	.07	9.4	8.10	.47	6.45	40.86	714.0	11.59	27.0	.82	9.3
20	13.76	3.30	.20	13.4	7.20	.66	11.21	100.74	500.7	7.80	60.0	2.35	13.8
21	20.90	4.50	.46	43.0	6.50	2.28	30.90	63.57	2260.4	35.34	36.2	7.44	13.0
22	7.44	3.90	.13				10.00	106.66	421.9	5.38	42.0	1.13	16.4
23	16.94	5.10	.41	9.3	9.65	.56	6.90	63.20	491.2	6.18	70.0	1.20	10.8
25	7.74	5.00	.13	10.8	5.20	.27	2.96	13.73	1053.8	10.78	28.5	1.65	9.3
26	4.23	3.80	.10	22.0	2.54	.43	22.86	68.14	1515.2	16.00	138.0	5.04	17.0
27	15.90	3.75	.23	24.2	7.00	1.30	5.71	96.00	267.6	3.23	63.0	2.75	11.7
28	7.74	7.80	.33	6.3	11.50	.38					41.5	1.27	8.7
29	13.31	5.10	.32	32.0	3.75	1.02					89.0	2.14	14.2
30	13.55	3.90	.18	17.0	8.30	.91	11.43	60.04	856.8	13.25	64.0	1.78	12.9
31	21.53	5.00	.43	36.7	2.30	.45	23.00	115.35	932.4	14.51	284.0	4.99	20.5
33	25.90	4.00	.55	42.0	1.40	.32	42.14	286.02	663.0	10.40	87.0	3.92	
34	11.90	4.00	.20	16.4	2.85	.31	9.83	56.10	788.7	14.37			
35	5.95	7.00	.23	6.5	8.31	.38	4.76	35.94	596.0	8.25			
X 41	14.80	3.90	.22	18.7	6.83	.93	15.65	143.00	492.4	7.67	176.0	3.11	
X 42	8.00	3.20	.10	19.0	7.50	.97	17.39	73.00	1077.8	13.37	57.0	2.58	
X 43	13.40	4.00	.22	24.6	2.75	.48	17.30	156.04	498.9	9.25	120.0	2.45	
X 44	6.88	3.50	.11	21.8	4.63	.48	20.00	87.90	1134.6	15.37	44.0	1.68	
X 47	12.40	6.00	.46	13.5	5.60	.57	10.98	85.90	761.6	9.09	68.5	2.50	
X 48	26.90	5.30	.87	20.6	6.40	1.06	20.00	89.70	1003.7	11.00	123.0	5.90	
X 50	14.80	4.75	.31					102.70			85.0	2.38	
X 51	9.20	4.20	.15	17.0	6.70	.85	12.63	69.52	817.5	10.39	102.0	2.74	
X 52	6.41	4.00	.10	18.3	7.30	.96	17.39	119.30	655.9	7.62	133.0	3.37	
X 53	15.49	6.50	.56	18.0	7.50	.89	14.76	112.20	591.9	9.53	79.0	2.99	
X 54	7.26	3.90	.11	30.0	9.25	1.60	18.65	100.14	917.0	14.71	81.5	2.36	



- TABLEAU III -

- Tableau des moyennes et écarts-types des différents paramètres -

	<u>Paramètres</u>	<u>Symboles</u>	<u>Moyennes</u>	<u>Écarts types</u>	<u>Nb observ.</u>
Sujet.....	{ Age.....	A	59,88	16.41	34
	{ Taille (cm).....	T	170,40	8,70	34
	{ Poids (kg).....	P	59.88	12.04	33
	{ Raideur thorax..... (daN/cm).....	$\Delta F/\Delta \delta$	13.24	3.49	20
Thorax.....	{ Epaisseur (cm).....	ETH	21.77	2.22	33
	{ Circonférence (cm).....	CTH	88.40	8.66	32
Dimensions côtes	{ Largeur (mm).....	LCO	11.96	2.19	34
	{ Epaisseur (mm).....	ECO	5.19	1.01	34
Section côtes	{ Surface totale (mm <sup>2</sup> )	S	68.15	15.45	34
	{ " d'os compact "	s	21.05	6.56	34
	{ " osseuse relative (%)	s/S	31.63	9.67	34
	{				
Minéralisation des côtes	{ $\frac{\text{Cendre}}{\text{masse fraîche}}$ (%)...	C/M	26.76	5.67	34
	{ $\frac{\text{Cendre}}{\text{long. côtes}}$ (g/cm)	C/L	.23	.07	32
	{ Quantité de sels minéraux (g/cm <sup>3</sup> )...	C/L.s.	1.09	.16	32
Essais dynamiques flex. côtes	{ Effort maxim. (daN).	Fd	11.78	5.85	34
	{ Flèche maxim. (mm).....	fd	4.62	1.13	34
	{ Energie de rupture (J).....	Wd	.25	.18	34
Essais statiques de flexion des côtes	{ Effort maxim. (daN).	Ff	19.22	9.52	32
	{ Flèche maxim. (mm).....	f	6.23	2.84	32
	{ Energie de rupture (J).....	Wf	.73	.45	32
	{ Pente partie linéaire de la courbe F (S)-(daN/mm).....	$\Delta F/\Delta \delta$	15.48	8.60	33
	{ Moment d'inertie (mm <sup>4</sup> ).....	Iyy'	98.46	53.20	32
	{ Module d'élasticité (daN/mm <sup>2</sup> ).....	E	780.72	405.03	31
	{ Contrainte de flexion (à la rupture (daN/mm <sup>2</sup> ))	$\bar{\sigma}$	10.92	6.08	31
Essais statiques de cisaillem. (2 sections cisailées)	{ Effort max. (daN).....	2 Fc	81.51	51.23	32
	{ Energie de rupture (J).....	2 Wc	2.56	1.42	32