

- SIMULATION BIOMECHANIQUE DES MEMBRES INFÉRIEURS -

G. STCHERBACHEFF, A. FAYON, C. TARRIERE (*)

R É S U M É

Les mannequins actuels ne rendent pas compte des fractures des membres inférieurs qui peuvent se produire lors de collisions voiture-piéton.

Dans le cadre d'une recherche sur la sécurité des piétons, les auteurs ont été amenés à mettre au point une simulation des os des membres inférieurs utilisable dans les mannequins et qui donne une réponse approchée sur la probabilité de fracture consécutive au choc.

Les bases biomécaniques, la réalisation du modèle et les premiers résultats obtenus dans l'emploi de ce mannequin à membres cassants sont détaillés et illustrés.

- INTRODUCTION -

Cette étude a été entreprise dans le cadre d'une recherche en cours sur la protection des piétons où il importait de simuler au mieux les membres inférieurs humains.

Les membres inférieurs des mannequins anthropomorphiques ont, en effet, une résistance sans aucun rapport avec celle correspondante de l'homme. Nous avons souhaité disposer d'os cassants pour simuler avec une meilleure précision les collisions véhicule-piéton, tant en ce qui concerne les résultats obtenus sur le piéton que la position et l'importance des impacts consécutifs des divers segments corporels avec la voiture car l'énergie absorbée par la fracture des os de la jambe et sa variation d'inertie apparente modifient la cinématique du mannequin lors d'un choc avec un véhicule; il en est de même pour la fracture du fémur. Les modèles mathématiques existants ne pouvant pas reproduire ces phénomènes, nous avons donc remplacé la jambe et la cuisse d'origine d'un mannequin SIERRA STAN, l'un des mannequins "debout" les plus récents, par un membre inférieur où le squelette métallique a fait place à deux éléments cylindriques simulant les os longs de la jambe raccordés par des articulations adaptées.

L'os est conçu de telle sorte que ses propriétés mécaniques puissent être modifiées au mur et à mesure que les données biomécaniques se précisent. Les articulations du genou, de la hanche et de la cheville peuvent être améliorées et, notamment, le mode de fixation de l'os à la pièce tenant lieu d'articulation.

L'adoption d'os cassants ne dispense pas, pour autant, du recours à d'autres critères pour évaluer la sévérité du choc du véhicule contre le membre inférieur du piéton. Nous mesurons systématiquement les accélérations au niveau du bassin, du genou et de la cheville.

(*) - LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE ET DE BIOMECHANIQUE DE L'ASSOCIATION
PEUGEOT-RENAULT

18, rue des Fauvelles.- 92250 - LA GARENNE-COLOMBES.- (France)

1.- CARACTERISTIQUES DE RUPTURE DES OS FRAIS DU MEMBRE INFERIEUR.-

1.1.- Données d'origine bibliographique.-

Il existe peu d'informations bibliographiques sur les propriétés mécaniques des tibias et fémurs. Pour l'essentiel, nous disposons des données d'une publication Australienne dont l'auteur, B. SHERWOOD MATHER, a étudié l'énergie nécessaire pour fracturer un fémur sous charge statique et sous impact dynamique.

Les résultats font apparaître une grande dispersion en dynamique et, dans une moindre mesure, en statique (FIG.1).

Dans une étude préliminaire, l'auteur s'est assuré que le fémur gauche et le fémur droit d'un même individu avaient les mêmes propriétés d'absorption d'énergie en statique et en dynamique.

La moyenne des énergies nécessaires pour fracturer 32 fémurs est de 3 kgm en statique et de 4,3 kgm en dynamique.

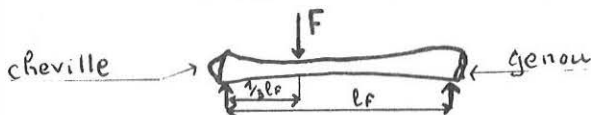
Le rapport de l'énergie absorbée en dynamique à l'énergie absorbée en statique par un fémur et celui qui lui est apparié a été évalué pour chaque paire. Ce rapport a une valeur moyenne de 1,66 (rapport calculé sur 32 paires). Les valeurs de ce rapport pour chaque paire de fémurs présentent une grande dispersion. (FIGURE 1).

Le coefficient de corrélation entre l'énergie absorbée à la rupture en dynamique et l'âge du sujet a été calculé ainsi que les coefficients de corrélation entre les propriétés physiques des fémurs testés en statique et l'énergie de rupture en dynamique des fémurs appariés.

Il apparaît que, pour l'échantillon considéré, l'énergie de rupture en dynamique dépend de la section de l'os considéré mais ne dépend pas de l'âge du sujet et des propriétés physiques de l'os. Ce résultat est inattendu dans la mesure où d'autres études (Messerer 1880, Motoshima 1960, MATHER 1968) ont établi que la résistance des os diminuait avec l'âge du sujet.

En conclusion, il est confirmé que les énergies de rupture en statique et en dynamique sont nettement différentes. D'autres études ont établi que les résultats variaient sensiblement avec les conditions d'essai.

Dans le cadre d'une étude sur la fracture de la jambe du skieur, Gerhard WITTMANN a effectué des essais de fracture de tibias sous charge statique appliquée comme indiqué sur le schéma ci-dessous. L'échantillon comporte 60 tibias.



La moyenne des efforts de rupture dans ces conditions d'essais est de 271 kg et l'écart type de la répartition est égal à 48 kg. (VOIR FIGURE N°2).

Résultats expérimentaux.-

L'absence de données bibliographiques concernant la rupture du tibia en dynamique et les efforts de rupture du fémur sous charge statique ont conduit les auteurs à réaliser des essais de fracture de tibias et de fémurs frais en statique et en dynamique.

L'énergie de rupture du tibia en dynamique nous intéresse tout particulièrement pour la simulation de la fracture de la jambe du piéton heurtée par le pare-chocs d'un véhicule.

1.2.1.- Résistance des os longs de la jambe sous charge statique.-

Conditions d'essai.-

L'os frais (tibia ou fémur), repose sur ses extrémités, la partie supérieure de la jambe vers le haut. Un cylindre de 3 cm de ϕ applique une charge sur l'os en son milieu, en se déplaçant de haut en bas d'un mouvement uniforme

de 5 cm/mm. L'effort appliqué est représenté graphiquement en fonction de la flèche. On en déduit l'énergie nécessaire pour fracturer l'os.

Résultats: VOIR TABLEAUX N° I et N° II.

On relève la dispersion importante des résultats, tant pour ce qui concerne la charge à la rupture que pour le travail effectué par l'effort appliqué. Nous n'avons pas effectué de calcul de corrélation, l'échantillon étant trop faible.

1.2.2.- Essais dynamiques.-

Conditions d'essai.-

L'os frais (tibia, fémur) repose sur ses extrémités. Il est heurté, en son milieu, par un pendule de masse équivalente égale à 6,8 kg animé d'une vitesse d'impact réglable. La mesure de la variation de vitesse du pendule entre l'instant où il entre en contact avec l'os et la fin de la fracture permet de calculer l'énergie absorbée par la fracture de l'os.

Résultats: VOIR TABLEAUX N° III et N° IV.

Les résultats obtenus confirment les dispersions observées par B. SHERWOOD MATHER. La moyenne des énergies absorbées par la fracture des 9 fémurs frais testés (3,7 kgm) est inférieure à celle calculée par B. SHERWOOD MATHER sur un échantillon de 32 fémurs (4,3 kgm). Comme valeur de référence, nous choisirons la moyenne pondérée des deux échantillons (4,17 kgm). Cette opération est légitime dans la mesure où nos conditions d'essai sont très proches de celles employées par B. SHERWOOD MATHER.

La valeur moyenne des énergies de rupture calculée sur 7 tibias est égale à 2,42 kgm. Nous ne disposons pas, pour l'instant, d'autres données bibliographiques et nous retiendrons par conséquent cette valeur comme référence pour la réalisation d'un tibia artificiel.

Au seuil 005, les valeurs moyennes des énergies de rupture des fémurs et des tibias diffèrent significativement (Test de STUDENT). On peut donc conclure que les fémurs sont plus résistants au choc que les tibias.

2.- Définition d'un cahier des charges pour la mise au point de tibias et fémurs artificiels.-

Pour la définition de l'os artificiel, nous avons utilisé les données biomécaniques obtenues comme décrit précédemment. Les données dynamiques sont prépondérantes, la fracture de la jambe du piéton heurté par un véhicule survenant en dynamique. Nous tentons, néanmoins, de nous rapprocher aussi, le plus possible, sur le modèle des données statiques.

2.1.- Energie de rupture du fémur en dynamique: 4,17 kgm.-

2.2.- Energie absorbée par la fracture du tibia en dynamique: 2,42 kgm.-

2.3.- Effort à la rupture du tibia en statique: 270 kg, énergie de rupture: 3,3 kgm, Flèche: 19 mm.

2.4.- Effort à la rupture du fémur en statique: 320 kg, énergie: 3,86 kgm, Flèche: 19 mm.

3.- Réalisation du modèle.-

L'os, de forme cylindrique, se compose d'un coeur en araldite entouré d'un enroulement de papier bakéliné non verni, le tout recouvert de plusieurs couches de tissu imprégné d'araldite (VOIR FIGURE N° 3). On peut modifier les propriétés mécaniques de l'os artificiel en faisant varier son diamètre extérieur, en augmentant ou en réduisant le nombre de couches de tissu imprégné d'araldite, de manière à se rapprocher du cahier des charges.

3.1.- Essais statiques et dynamiques de tibias et fémurs artificiels.-

3.1.1.- Essais statiques.-

Dix tibias et dix fémurs artificiels ont été fracturés sous charge statique.

Conditions d'essai:

Les conditions d'essais d'os artificiels en statique sont identiques à celles utilisées pour les fractures d'os frais.

a) Tibias.- (TABLEAU V).-

Les résultats sont très satisfaisants, tant en ce qui concerne les charges de rupture que les énergies de rupture (TABLEAU IX). Une dispersion existe ($\sigma = 13,85$ kg et $\sigma' = 0,37$ kgm) mais très acceptable compte tenu de la dispersion sur l'os frais ($\sigma = 99,4$ kg et $\sigma' = 1,456$ kgm).

b) Fémurs.- (TABLEAU VI).-

Les résultats sont satisfaisants en ce qui concerne les charges de rupture. Les énergies de rupture observées sur le modèle sont nettement plus élevées que celles mesurées sur les tibias frais. Leur diminution devrait être recherchée, quitte à perdre la conformité du modèle à l'os frais pour les charges de rupture.

3.2.1.- Essais dynamiques.-

Dix fémurs et quatre tibias simulés ont été fracturés en dynamique.

Conditions d'essai:

Les conditions d'essais d'os artificiels en dynamique sont identiques à celles utilisées pour fracturer les os frais.

a) Tibias.- (TABLEAU VII).-

Les énergies de rupture observées en dynamique sont beaucoup trop importantes pour satisfaire le cahier des charges (TABLEAU IX). Elles ne sont pas comprises dans la dispersion observée pour les os frais.

Nous avons entrepris la réalisation d'une nouvelle génération de tibias simulés, de façon à diminuer l'énergie de rupture en dynamique pour satisfaire pleinement le cahier des charges.

b) Fémurs.- (TABLEAU VIII).-

Bien qu'étant toutes comprises à l'intérieur de la dispersion observée pour les os frais, la moyenne des énergies de rupture ($m = 5,95$ kgm; $\sigma = 1,5$ Kgm) des fémurs simulés en dynamique est trop importante pour satisfaire notre cahier des charges (TABLEAU IX). Les données statiques suggèrent déjà de réduire la résistance du modèle.

Nous avons entrepris, comme pour les tibias simulés, la réalisation d'une nouvelle génération de fémurs simulés, de façon à réduire l'énergie de rupture en dynamique.

BIBLIOGRAPHIE.-

- 1) - B. SHERWOOD MATHER.- Observations on the effects of Static and Impact Loading on the Human Femur.- Extrait de Biomechanics vol.1 pp.331-335 - 1968.
- 2) WITTMANN (G.) - Untersuchungen zur bruchfestigkeit und zum verformungsverhalten des schienbeins.- Extrait de Biomechanische Untersuchungen zum verletzungsschutz im Alpinen Skisport.- Dip. Ing. Gerhard WITTMANN.

DISCUSSION.-

Les essais de fracture d'os frais ont été effectués avec des échantillons prélevés sur des cadavres. On peut penser que les os longs du membre inférieur d'adulte en bonne santé sont, en moyenne, plus résistants.

On notera que les essais de fracture de tibias frais en dynamique ont été effectués sans le péroné. Sur les 7 tibias testés en statique, trois étaient associés au péroné. La part de l'énergie totale de rupture absorbée par le péroné varie entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{9}$ de l'énergie totale en statique en choc latéral sur la face externe de la jambe. Les résultats que nous avons obtenus en dynamique sur des tibias associés à des péronés auraient été plus élevés et, par conséquent, plus proches des résultats obtenus avec nos tibias simulés.

En statique, l'os simulé satisfait notre cahier des charges.

La nouvelle génération d'os simulés que nous avons actuellement à l'étude devra tenir compte des deux remarques précédentes et se fonder, en conséquence, sur des essais effectués avec des tibias associés au péroné. Le nouveau cahier des charges ainsi établi sera, très certainement, plus proche de nos résultats obtenus en dynamique avec notre première génération d'os simulés.

Au test de la fracture du membre inférieur du mannequin, nous avons associé des mesures d'accélération au niveau du genou et de la cheville. Les premiers résultats que nous avons obtenus au niveau du genou ne nous paraissent pas satisfaisants et un nouveau modèle d'articulation est à l'étude de façon à obtenir des résultats plus proches de la réalité.

CONCLUSION.-

La formule adoptée pour la construction de notre os artificiel nous paraît bonne, tant par sa reproductibilité très améliorée que par sa souplesse dans les possibilités d'ajustement de ses propriétés mécaniques.

Mais la qualité de la simulation de la fracture des os longs du membre inférieur d'un piéton heurté par un véhicule dépend aussi du mode de fixation des os aux articulations, du modèle des articulations, d'une bonne répartition des masses ainsi que du choix d'un matériau simulant la chair.

C'est en agissant sur ces différents facteurs que nous pensons améliorer la qualité de la simulation et étudier l'apparition de la fracture du membre inférieur du piéton heurté par un véhicule ainsi que les modifications de cinématique apportées par ce phénomène.

TABLEAU I.- RUPTURE EN STATIQUE DE TIBIAS FRAIS.-

TIBIA	Longueur mm	Diamètre mm	Flèche de Rupture-mm	Charge de Rupture-Kg	Energie de Rupture Kgm
N° 1 + Péroné	325	25	15	145	1,7
N° 2 + Péroné	400	25	18	325	4,8
N° 3 + Péroné	400	24	25	410	5,8
N° 4 ...	338	24,4	24	170	2,6
N° 5 ...	393	32,6	14	365	3,1
N° 6 ...	392	31,6	19	250	2,5
N° 7 ...	308	24,6	19	230	2,6
Moyenne	365	26,74	19,14	270,7	3,3
Ecart Type	$\sigma = 39,87$	$\sigma = 3,69$	$\sigma = 4,14$	$\sigma = 99,4$	$\sigma = 1,456$

TABLEAU II.- RUPTURE EN STATIQUE DE FEMURS FRAIS.-

FEMUR	Longueur mm	Diamètre mm	Flèche de Rupture-mm	Charge de Rupture-Kg	Energie de Rupture Kgm
N° 1 ...	473	28,3	21,5	382	5,12
N° 2 ...	473	28,3	25	337	4,85
N° 3 ...	460	31,4	18,4	415	4,80
N° 4 ...	474	31,5	15,5	340	3,10
N° 5 ...	383	26,3	16	160	2,25
N° 6 ...	385	25,5	17	290	3,05
Moyenne	441,33	28,55	18,90	320	3,86
Ecart Type	$\sigma = 44,71$	$\sigma = 2,5$	$\sigma = 3,68$	$\sigma = 89,5$	$\sigma = 1,206$

TABLEAU III.- RUPTURE EN DYNAMIQUE DE FEMURS FRAIS.-

ECHANTILLON	Longueur - mm -	Diamètre maxi- mm -	Energie de Rupture Kgm
N° 1	430	33	4,4
N° 2	400	30	4,3
N° 3	440	30	4,1
N° 4	425	30	2,5
N° 5	420	30	5,45
N° 6	420	28	2
N° 7	460	35	4,7
N° 8	440	30	3,1
N° 9	430	33	2,9
Moyenne	429,44	31	3,71
Ecart Type	$\sigma = 16,67$	$\sigma = 2,18$	$\sigma = 1,14$

Vitesse du pendule à l'impact $\sim 4,75$ m/s

Masse Equivalente du pendule: 6,8 kg.

TABLEAU IV.- RUPTURE EN DYNAMIQUE DE TIBIAS FRAIS.-

ECHANTILLON	Longueur - mm -	Diamètre maxi - mm -	Energie de Rupture - Kgm -
N° 1	370	31,5	4
N° 2	390	34	2,35
N° 3	340	30	1,1
N° 4	340	25	1,4
N° 5	340	28	4,6
N° 6	360	27	2,3
N° 7	380	32	1,2
Moyenne	360	29,64	2,4
Ecart Type	$\sigma = 20,8$	$\sigma = 3,14$	$\sigma = 1,4$

Vitesse du Pendule à l'impact $\sim 4,75$ m/s - Masse équivalente du Pendule: 6,8 kg

TABLEAU V.- RUPTURE EN STATIQUE DE TIBIAS ARTIFICIELS.-

TIBIA	Flèche de rupture - mm -	Charge de rupture - kg -	Energie de rupture - Kgm -
N° 1	21	255	2,87
N° 2	20	270	3
N° 3	17	240	2,5
N° 4	21	270	3,2
N° 5	19	265	3
N° 6	20,2	245	2,7
N° 7	21,7	257	3,2
N° 8	20,7	267	3,18
N° 9	23,7	285	3,9
N° 10	21,5	247	2,87
Moyenne	20,6	260,1	3,04
Ecart Type	$\sigma = 1,76$	$\sigma = 13,85$	$\sigma = 0,37$

TABLEAU VI .- RUPTURE EN STATIQUE DE FEMURS ARTIFICIELS.-

FEMUR	Flèche de rupture - mm -	Charge de rupture - kg -	Energie de rupture - Kgm -
N° 1	26	365	5,4
N° 2	27	355	5,4
N° 3	25	345	4,87
N° 4	27	355	5,56
N° 6	24,5	305	4,18
N° 7	27,5	332	5,18
N° 8	28	340	5,3
N° 9	27,7	337	5,18
N° 10	26	330	4,87
Moyenne*	26,4	341	5,12
Ecart Type	$\sigma = 1,16$	$\sigma = 16,92$	$\sigma = 0,40$

TABLEAU VII.- RUPTURE EN DYNAMIQUE DE TIBIAS SIMULES.-

Echantillon	Longueur mm.	Diamètre maxi mm.	Energie de rupture - Kgm.
N° 1	350	25	3,8
N° 2	350	25	4,1
N° 3	350	25	4,8
N° 4	350	25	4,8
Moyenne	350	25	4,37
Ecart Type	350		$\sigma = 0,5$

Vitesse du pendule à l'impact $\sim 3,75$ m/s - Masse équivalente du pendule: 6,8 kg

TABLEAU VIII.- RUPTURE EN DYNAMIQUE DE FEMURS SIMULES.-

Echantillon	Longueur mm.	Diamètre maxi mm	Energie de rupture - Kgm.
N° 1	440	30	2,93
N° 2	440	30	6,10
N° 3	440	30	6,74
N° 4	440	30	7,90
N° 5	440	30	6,10
N° 6	440	30	7,16
N° 7	440	30	7,16
N° 8	440	30	5,45
N° 9	440	30	6,22
N° 10	440	30	3,80
Moyenne	440	30	5,95
Ecart Type			$\sigma = 1,5$

-SECTION d'OS SIMULE-

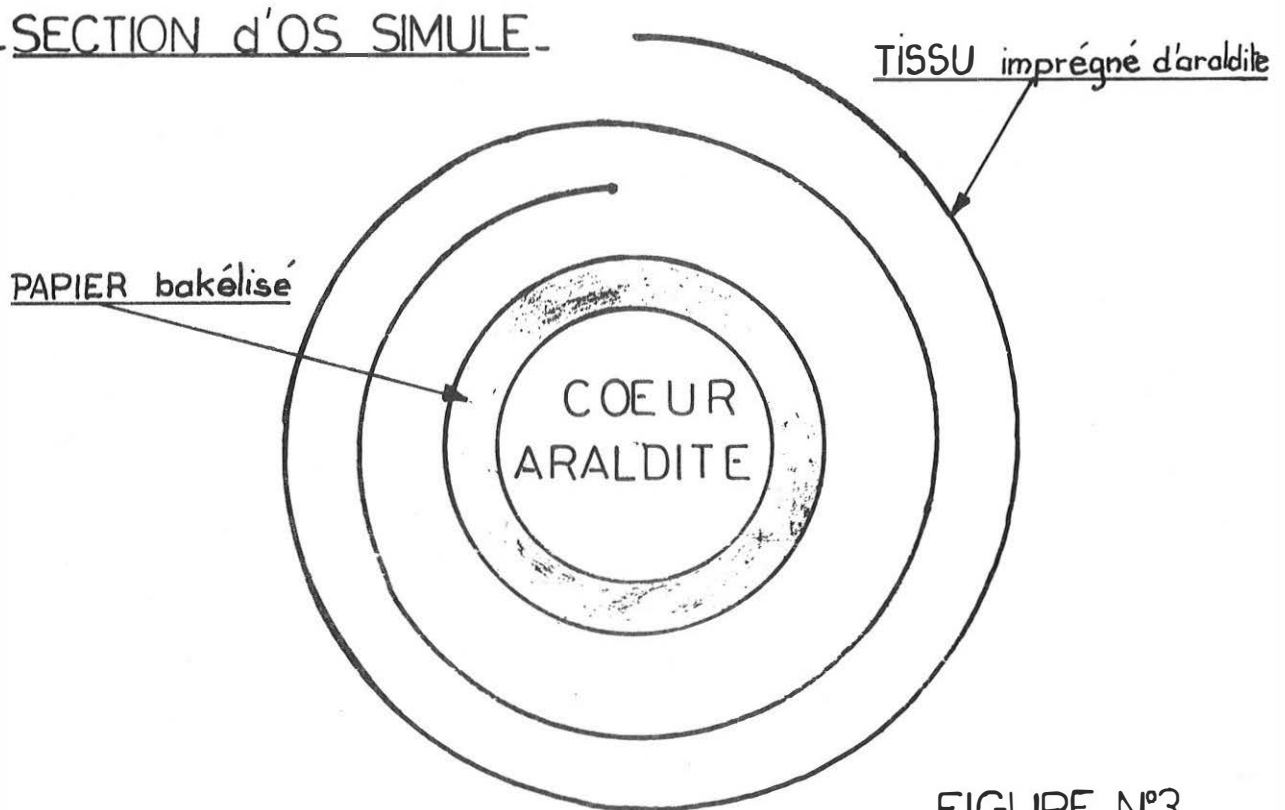
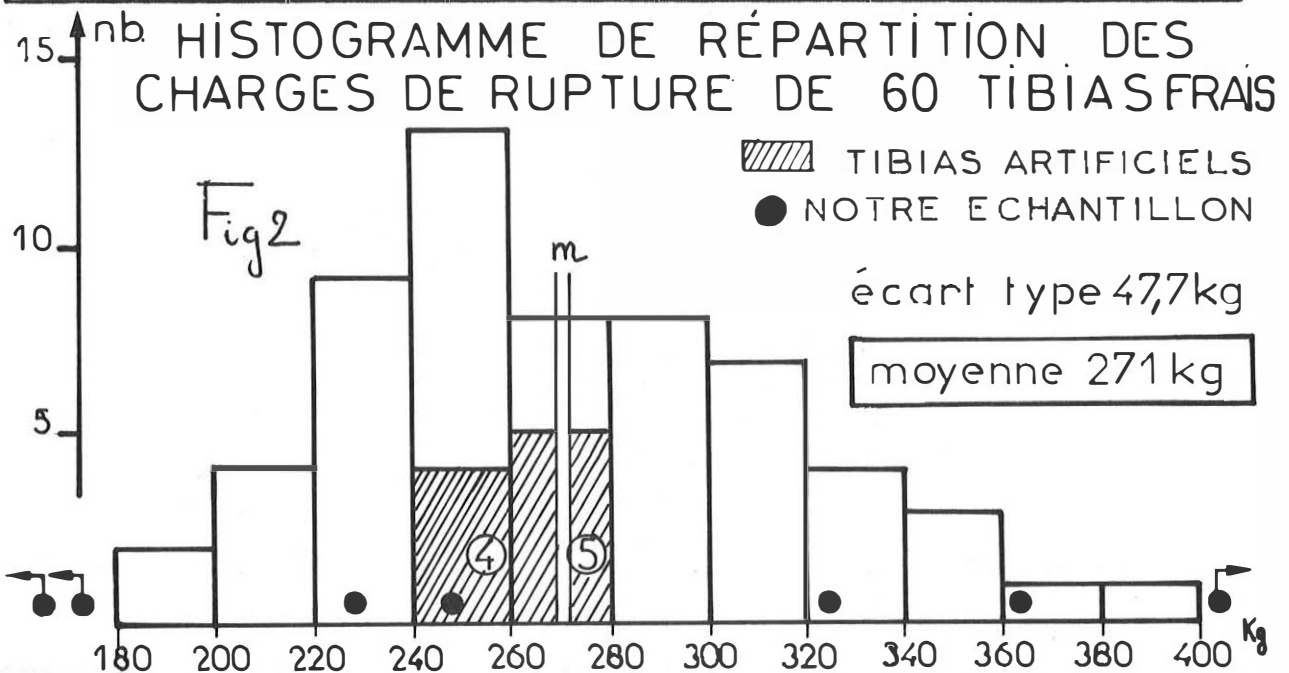


FIGURE N°3

- TABLEAU IX -

- DONNEES RETENUES POUR LA SIMULATION -

	Longueur	Diamètre	Flèche Stat. Rupture	Charge Stat. Rupture	Energie Stat. Rupture	Energie Dynamique
FEMUR frais	441 mm	28,3 mm	19 mm	320 kg	3,86 Kgm	4,17 Kgm
FEMUR artific.	460 mm	30 mm	26 mm	341 kg	5,22 Kgm	5,95 Kgm
	$\frac{\Delta l}{l} = 4\%$	$\frac{\Delta \phi}{\phi} = 6\%$	$\frac{\Delta f}{f} = 37\%$	$\frac{\Delta p}{p} = 6\%$	$\frac{\Delta Es}{Es} = 35\%$	$\frac{\Delta Ed}{Ed} = 42\%$
TIBIA frais	365 mm	27 mm	19 mm	270 kg	3,3 Kgm	2,42 Kgm
TIBIA artific.	360 mm	25 mm	20,6 mm	262 kg	3,04 Kgm	4,37 Kgm
	$\frac{\Delta l}{l} = 1,3\%$	$\frac{\Delta \phi}{\phi} = 7\%$	$\frac{\Delta f}{f} = 8\%$	$\frac{\Delta p}{p} = 3\%$	$\frac{\Delta Es}{Es} = 8\%$	$\frac{\Delta Ed}{Ed} = 80\%$



ENERGIES DE RUPTURE DES FEMURS

fig 1.

D'après SHERWOOD MATHER

[X] essais PEUGEOT-RENAULT

