



## EVALUATION DES FERRURES AMORTISSANTES PAR UNE METHODE DE MESURE ACCELEROMETRIQUE

par: E. BARREY(\*), P. BENOIT(\*\*),  
J.C. REGNAULT(\*\*\*), J.L. BROCHET(\*\*\*\*)

- (\*) Centre INRA, SGQA - Unité cheval  
F-78352 JOUY-EN-JOSAS Cedex  
(\*\*) ENVA - Service de Nutrition  
F-94704 MAISONS ALFORT Cedex  
(\*\*\*) Garde Républicaine, Régiment de cavalerie -  
Service vétérinaire  
F-75181 PARIS Cedex 04  
(\*\*\*\*) Maréchal ferrant, rue du Gouffre,  
F-77120 ST AUGUSTIN.

### Résumé:

La mesure de l'accélération du sabot sur un cheval au trot a permis de comparer l'amortissement de l'impact procuré par 10 ferrures différentes comportant soit des plaques, soit des fers en alliage d'aluminium ou en polyuréthane. Lors de l'impact, la décélération maximale varie respectivement de 327 (+/-55) à 746 (+/-14) m/s<sup>2</sup> (P<0,01) pour la ferrure la plus amortissante, comportant une semelle en polyuréthane et le fer en acier. Après l'impact, la fréquence des vibrations est plus réduite pour les fers en alliage d'aluminium et en polyuréthane (364 Hz +/-23) que pour les fers en acier (503 Hz +/-49)(P<0,01).

Mots clés : MARECHALERIE, FERRURE, IMPACT, CHOC, BOITERIE

### Summary:

The measurement of hoof acceleration of trotting horses was used to compare damping effect of different shoes during the impact. The forelimbs of the horses were shod with 10 types of shoeing like steel, aluminium and polyurethane shoes and different pads associated with a traditional steel shoe. At impact, the maximum deceleration rate had extreme values such as 327 (+/- 55) to 746 m/s<sup>2</sup> (+/-14) respectively for steel shoe and the more efficient polyurethane shoe (P<0,01). After the shock, the vibrating frequency was smaller for aluminium and polyurethane shoes (364 Hz +/- 23) than for steel shoe (503 Hz +/-49)(P<0,01).

Key-words : FARRIERY, SHOEING, HEEL-STRIKE, SHOCK, LAMENESS

L'impact contre le sol constitue le premier phénomène mécanique de la phase d'appui qui sollicite en général d'abord les talons, puis s'étend à l'ensemble du pied qui vibre sous l'effet du choc. Nos résultats expérimentaux (BARREY 1990 a) ainsi que ceux publiés par PRATT (1984) mettent bien en évidence la brutalité du choc initial du sabot contre le sol. L'impact se traduit, sur les tracés de force, par un pic suivi d'oscillations de courte période (PRATT et O'CONNOR 1976, KINGSBURY et al. 1978, ROONEY et al. 1978, UEDA et al. 1981, NIKI et al. 1982, DALIN et JEFFCOTT 1985). Sur les tracés d'accélération, la phase du choc suivie par la phase vibratoire est encore plus évidente (BARREY 1990 a). On rencontre également ce phénomène vibratoire de haute fréquence sur les tracés de force mesurés en locomotion humaine (SIMON et al. 1981). NIGG (1983) propose d'appeler cet événement initial de la phase d'appui : la "force passive". En effet, la brièveté de ce phénomène empêche tout contrôle neuro-musculaire réflexe. En revanche, la force active qui lui succède, fait intervenir une régulation du tonus neuro-musculaire.

Pour encaisser les chocs sans dommages, le sabot et les articulations du membre se déforment pour réduire rapidement l'énergie cinétique du membre au début de la phase d'appui. Au sein du pied les structures sont adaptées à subir des déformations visco-élastiques (corne du sabot, coussinet plantaire, compression du plexus veineux). Lorsque la vitesse relative du sabot par rapport au sol devient grande aux allures rapides, ces mécanismes d'amortissement passif deviennent insuffisants. Ainsi, lors de l'impact, l'énergie cinétique du membre n'est pas instantanément dissipée si bien qu'il subsiste pendant quelques milli-secondes une part d'énergie libre résiduelle qui provoque des vibrations (ROONEY 1981). Le choc sur le sol déclenche la propagation d'une onde qui remonte le long du membre par l'intermédiaire du squelette. Chez l'homme, des enregistrements accélérométriques simultanés au niveau du talon, du tibia et de la mâchoire mettent bien en évidence la propagation de cette onde de choc qui est responsable de certaines pathologies de l'appareil locomoteur du sportif (LIGHT et al. 1980, GOT 1987, JORGENSEN 1989).

Chez les athlètes humains, la prévention de ces affections a progressé grâce à l'amélioration des pistes et à la conception de chaussures plus ergonomiques, dotées de matériaux amortissants. Chez le cheval, ces principes restent valables et on recherchera donc des pistes confortables (BARREY et al. 1990 b), un aplomb du pied équilibré (BARREY 1990 c) et une ferrure capable d'amortir les chocs. L'interposition d'une plaque en polymère visco-élastique entre le sabot et le fer semble réduire l'amplitude du choc (VASKO et FARR 1984). Un fer en alliage d'aluminium dont la structure a été dessinée en fonction des principes biomécaniques de fonctionnement du pied, semble procurer davantage de confort que les fers traditionnels en acier (VANSCHEPDAEL 1988). La mise en place d'une semelle d'usure en polyuréthane sur un support en métal cloué sur le sabot, est également proposé pour réduire les effets néfastes des chocs répétés (VINDRIIS 1990).

Le recours aux ferrures amortissantes devenant une pratique courante tout à fait justifiée, il s'avérait nécessaire d'évaluer les propriétés des diverses ferrures dites "amortissantes" actuellement disponibles sur le marché. La mise au point d'une méthode de mesure accélérométrique appliquée au sabot a permis de comparer les propriétés mécaniques d'amortissement de 10 ferrures.

## **MATERIEL ET METHODE**

### *Ferrures testées*

Le tableau 1 récapitule les caractéristiques des ferrures qui ont été testées. Hormis le sabot nu et le fer standard en acier deux catégories de ferrures couramment employées ont été choisies pour leurs potentialités amortissantes : 5 associations d'une plaque avec un fer en acier et 4 fers en matériaux moins raides que l'acier (alliage d'aluminium, polyuréthanes diverses). Les ferrures ont été posées sur les deux antérieurs et le parage des pieds n'a pas été modifié. Les plaques étaient posées de manière traditionnelle, maintenues entre la paroi et le fer par les clous. Toutes les plaques ont été posées avec les fers acier que portaient les chevaux avant l'expérimentation. Les fers n°9 et n° 12 sont constitués d'une structure en aluminium sur laquelle est moulé du polyuréthane. Le fer N°9 était

fixé par des languettes collées sur la paroi au moyen d'une colle au cyanocrylate. Le fer N°10 est constitué d'un alliage d'aluminium (AG3T de Pechiney). Le fer N°11 comportait un support métallique cloué sur le sabot, sur lequel venait se fixer une semelle d'usure en polyuréthane.

### *Les chevaux*

L'objet de ce travail étant de mettre en évidence l'effet des plaques de maréchalerie sur les paramètres biomécaniques de l'impact du pied, nous avons volontairement réduit la variabilité liée au cheval en n'utilisant que deux chevaux de caractéristiques très homogènes (Poids= 480 et 500 kg; Angle moyen des sabots antérieurs= 51° et 49°). Les chevaux étaient indemnes de toute boiterie et portaient avant l'expérimentation des fers en acier.

### *Mesures accélérométriques lors de l'impact*

Un accéléromètre uniaxial fixé latéralement par une sangle inextensible contre la paroi du sabot (Figure I) est relié à une chaîne d'acquisition portative pilotée par un micro-ordinateur. Celle-ci permet d'enregistrer 2034 mesures/s pendant deux secondes ce qui correspond à 2 ou 3 foulées de trot. Les mesures d'accélération ont été faites sur les deux antérieurs.

### *Protocoles de mesure*

Afin de minimiser l'effet du sol sur les paramètres dynamiques mesurés, les tests ont été réalisés sur une piste plane en bitume. Les tests s'effectuaient sur le cheval tenu en main au trot, sur une trajectoire rectiligne. L'enregistrement de l'accélération du sabot était lancé lorsque la cadence des foulées était régulière.

Pour les deux chevaux, des mesures de références ont été pratiquées sur chacun des antérieurs ferrés avec les fers en acier. Ils étaient ensuite déferrés des deux antérieurs puis referrés successivement avec des couples de ferrures de masse et d'épaisseur comparable.

Trois paramètres sont mesurés sur les tracés d'accélération au moyen d'un programme informatique. Le choc est caractérisé par la décélération maximale (CHOC). Les vibrations engendrées par le choc sont quantifiées par la fréquence moyenne des vibrations (FREQ) et la durée des vibrations (DVIB) (Figure V).

### *Traitement statistique des données*

Pour chaque ferrure testée, la moyenne et l'écart-type des paramètres ont été calculés sur 3 à 6 foulées. Les moyennes des différentes ferrures sont comparées à celles du fer en acier par un test de t. Ces résultats sont également traités par une analyse en composantes principales (ACP) afin de comparer les ferrures entre elles en tenant compte de toutes les informations expérimentales recueillies. Enfin, pour déterminer l'existence possible d'un effet de pied (gauche ou droit) ou d'un effet de cheval les résultats obtenus ont été comparés par une analyse de la variance.

## **RESULTATS**

L'analyse de la variance ne révèle aucune différence significative entre les résultats des paramètres biomécaniques mesurés sur l'antérieur droit ou gauche ( $93,3\% < P < 23,1\%$ ), ni entre les deux chevaux ( $64,4\% < P < 40,6\%$ ). Ces résultats permettent d'attribuer la majeure partie de la variabilité des paramètres aux effets des différentes ferrures.

Les figures II, III et IV récapitulent les résultats des tests. La décélération maximale du choc atteint en moyenne 596 m/s<sup>2</sup> (+/-97). La fréquence moyenne des vibrations est de 457 Hz (+/-76) et leur durée moyenne est de 38,6 ms (+/-11,4). Lors de l'impact, la décélération maximale varie respectivement de 327 (+/-55) à 746 (+/-14) m/s<sup>2</sup> ( $P < 0,01$ ) pour la ferrure la plus amortissante,

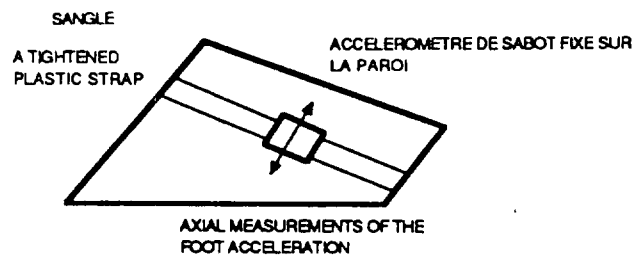
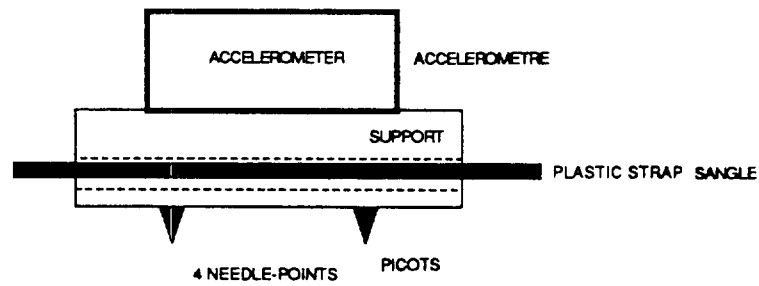


Figure I : Accéléromètre uniaxial fixé contre la paroi du sabot au moyen d'une sangle en matière plastique.

Figure I : Uniaxial accelerometer fixed laterally on the wall of the hoof with a tightened plastic strap.

Tableau 1 - Caractéristiques des ferrures  
Table 1 - Characteristics of the horse shoes

N° number	FERRURES Type of shoeing	MASSE (g) Weight	EPAISSEUR (mm) Thickness
1	Fer acier	350	10
2	Sabot nu	0	0
PLAQUES DE MARECHALERIE		Horse shoe pads	
3	SORBOTHANE <sup>a</sup> Duro 50/Support	125 + 350	7 + 10
4	Plaque bleu = Support	105 + 350	3 + 10
5	Cuir	85 + 350	6,5 + 10
6	STRIDER <sup>a</sup> brune-orange	85 + 350	3,8 + 10
7	Plaque tricouche	100 + 350	5,8 + 10
8	SHOCKTAMER <sup>a</sup>	90 + 350	4,1 + 10
FERS		Shoes	
9	EASY-GLU <sup>a</sup>	215	17,3
10	SPRINGTOP <sup>a</sup>	235	15,0
11	SLEIPNER SPORT <sup>a</sup>	395	18,5
12	NAIL-ON <sup>a</sup>	255	19,2

<sup>a</sup> = marques déposées = trade-marks

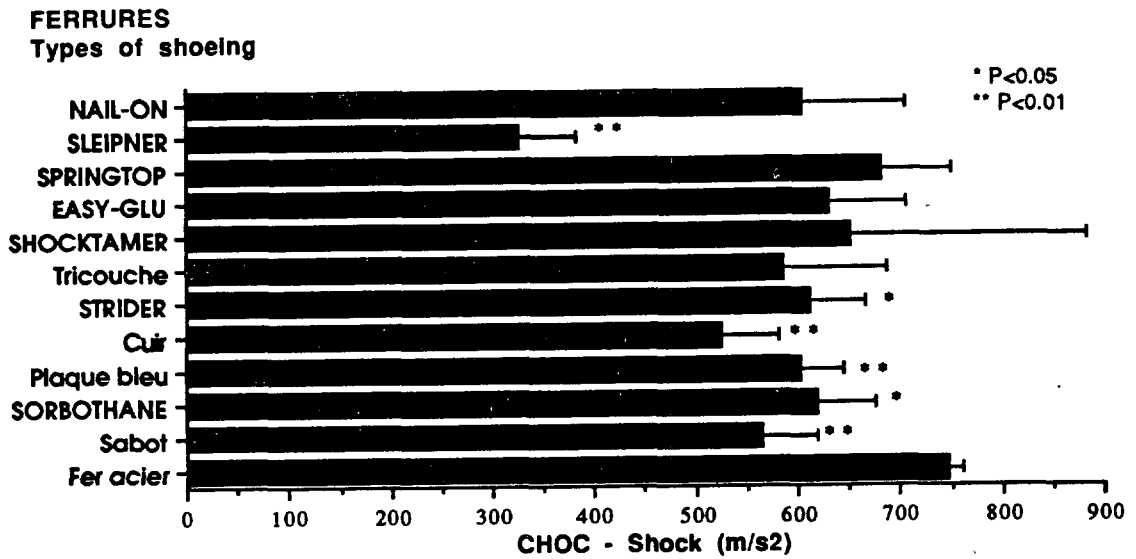


Figure II : Moyennes et écart-types de la décélération maximale (CHOC).  
Figure II : Means (sem) of the maximum deceleration (CHOC).

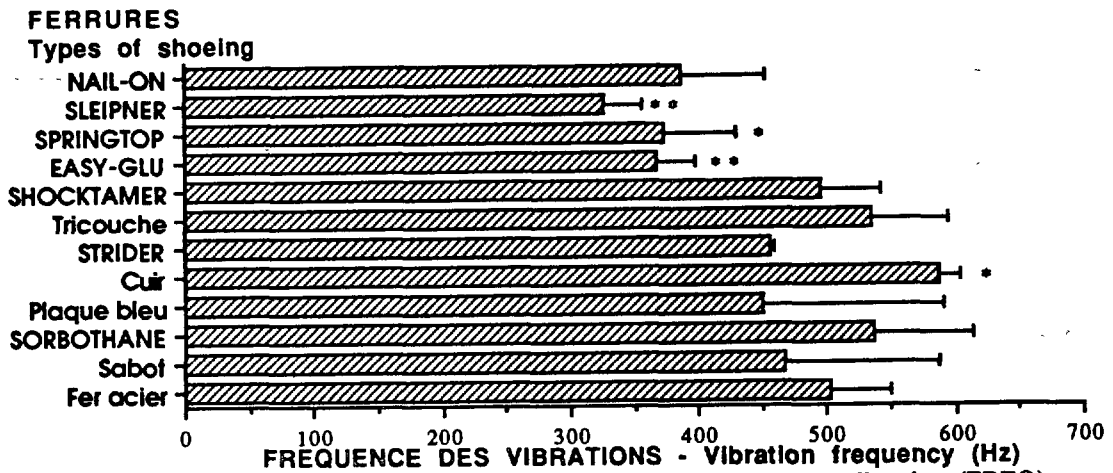


Figure III : Moyennes et écart-types de la fréquence de vibration (FREQ).  
Figure III : Means (sem) of the vibration frequency (FREQ).

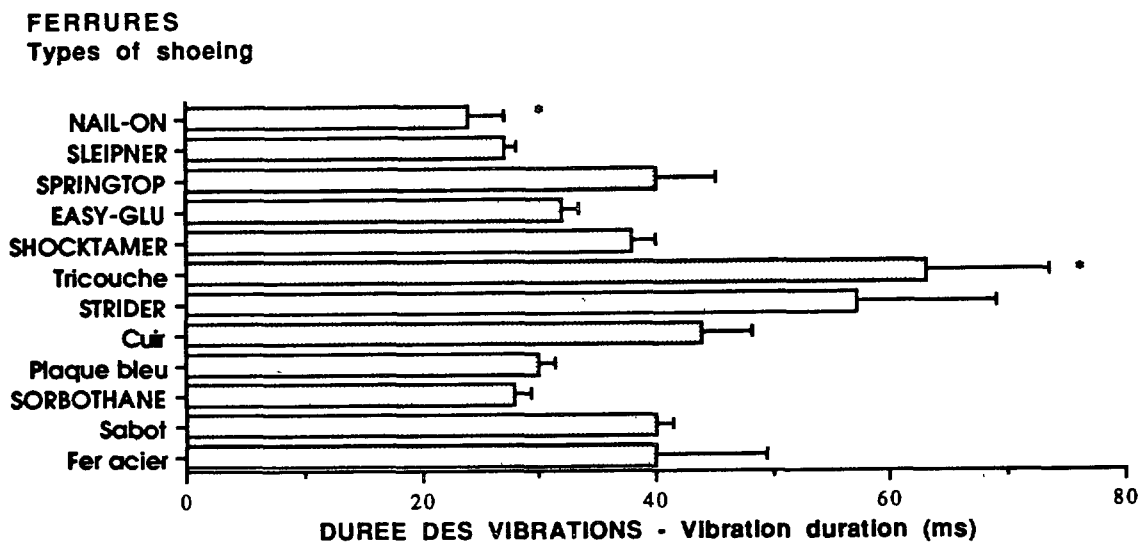


Figure IV : Moyennes et écart-types de la durée des vibrations (DVIB).  
Figure IV : Means (sem) of the vibration duration (DVIB).

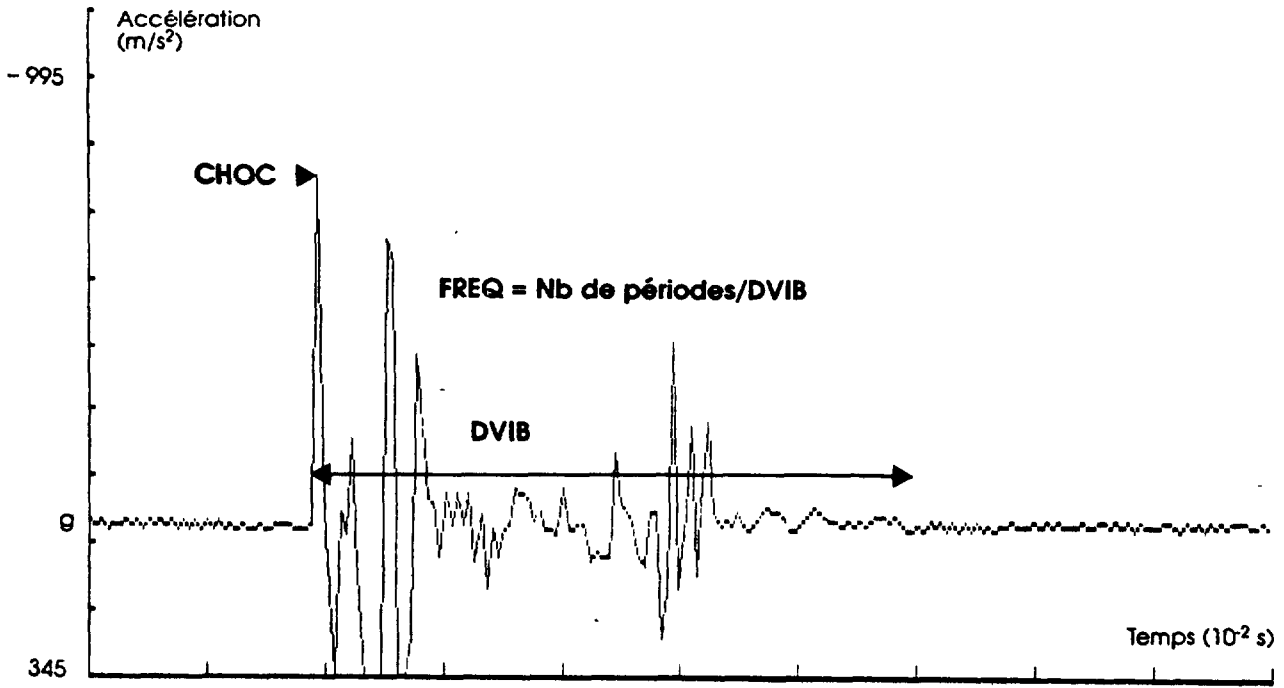
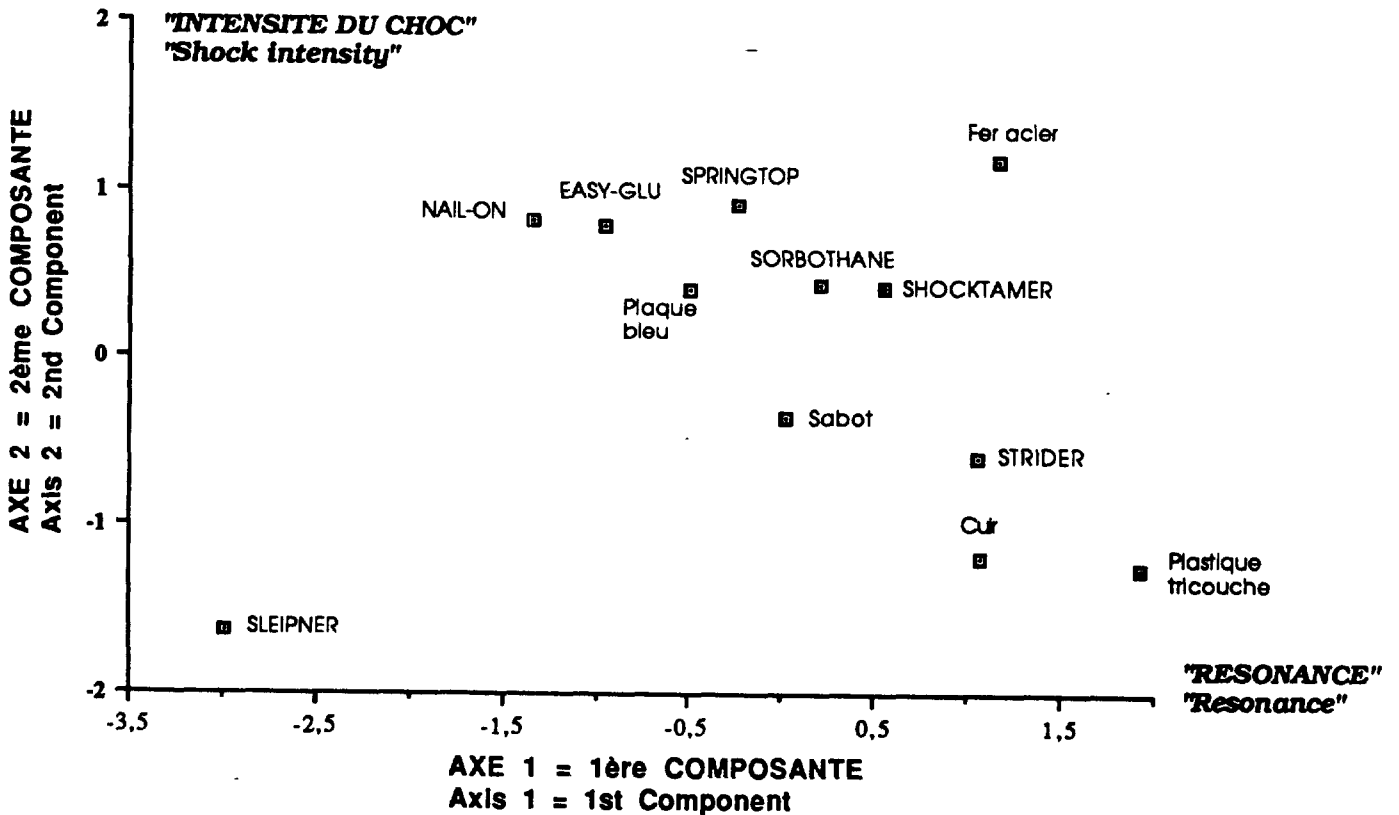


Figure V : Exemple d'enregistrement accélérométrique obtenu avec un fer en acier au moment de l'impact du sabot sur le bitume.  
 Figure V : Example of the hoof acceleration time curve obtained with a steel shoe on asphalt.

Figure VI : Résultats de l'analyse en composantes principales dans le plan des deux premières composantes.  
 Figure VI : Results of principal component analysis on the first two component axes.



comportant une semelle en polyuréthane et le fer en acier. Après l'impact, la fréquence des vibrations est plus réduite pour les fers en alliage d'aluminium et en polyuréthane (364 Hz +/-23) que pour les fers en acier (503 Hz +/-49) ( $P < 0,01$ ).

La figure V représente un exemple d'enregistrement accélérométrique au moment de l'impact du sabot sur le sol. Le choc entre le fer en acier et le bitume est très dur, ce qui se traduit par une décélération maximale (CHOC) de grande amplitude qui évolue très rapidement (pic d'une durée de 1 à 3 1/1000 èmes de seconde). Ce choc initial excite l'ensemble du pied qui se met à vibrer à une fréquence élevée (FREQ) pendant une durée de 40 ms environ.

Dans le but de clarifier l'exposé des résultats, nous présenterons l'ACP sous une forme graphique en utilisant la projection du nuage des points dans le plan des deux premières composantes. La première composante (axe 1) en regroupant les deux variables les plus significatives (FREQ et DVIB), explique 54,4 % de la variation totale. La deuxième composante (axe 2) recouvre surtout la variable CHOC et explique 28,3 % de la variation totale. La combinaison de ces deux premières composantes (82,7 % de la variation totale) permet donc de construire une représentation graphique qui compare les ferrures en tenant compte simultanément des trois paramètres (Figure VI). Pour interpréter cette analyse, il est possible d'attribuer à chaque axe une signification mécanique particulière. L'axe 1 recouvre la notion de "résonance" tandis que l'axe 2 représente plutôt "l'intensité du choc" initial. Les ferrures les plus confortables réduisent simultanément le choc et la résonance du pied. Le fer en acier apparaît ainsi comme le moins favorable tandis que la ferrure N°11 semble la plus amortissante.

## DISCUSSION

Le protocole expérimental a été appliqué sur un nombre très restreint de chevaux. Ce faible nombre a été délibérément choisi pour s'affranchir des effets liés au cheval. Dans cette étude, ce sont les ferrures qui constituent les individus statistiques et le nombre de foulées mesurées avec la même ferrure qui conditionne la répétition des mesures. Pour décrire au mieux les résultats de cette étude, nous avons eu recours à l'analyse en composantes principales qui décrit les rapports entre les variables et compare les individus entre eux.

Il convient de bien souligner que le protocole expérimental employé permet d'évaluer uniquement les propriétés amortissantes de la ferrure au moment de l'impact. Celles-ci sont liées surtout aux matériaux constitutifs et, pour une moindre part, au procédé de fixation et à la forme géométrique de la ferrure.

A notre connaissance, seul le travail de VASKO et FARR (1984) expose des résultats partiels, obtenus avec des plaques en polyuréthane. Les auteurs rapportent une réduction de l'amplitude maximale du choc de 78 % et un prolongement de la durée du choc de 270 %. Ces résultats semblent très optimistes et ne sont pas en accord avec les nôtres en ce qui concerne la plaque N°3 (choc de 619 m/s<sup>2</sup> (+/-56), soit une réduction 17 % par rapport au fer en acier).

Les variations d'accélération que nous mesurons au niveau du sabot d'un cheval sont beaucoup plus grandes qu'au niveau du garrot. Au trot sur du bitume, la décélération maximale du sabot ferré atteint en moyenne 746 m/s<sup>2</sup> alors qu'au même instant on enregistre une décélération verticale au niveau du garrot d'environ 10 m/s<sup>2</sup> (DRONKA et VALLAT 1989), ce qui implique l'intervention de la fonction amortissante du membre. La soudaineté et la brièveté de l'impact écartent toute possibilité d'amortissement actif par réflexe neuro-musculaire. En conséquence, l'amortissement de l'impact ne peut être assuré que par des mécanismes passifs de déformations réversibles des structures anatomiques du pied. La ferrure placée à l'interface du sabot et du sol peut donc participer efficacement à l'amortissement du choc dans la mesure où elle est constituée de matériaux amortissants appropriés.

Pour minimiser le choc lors de l'impact du sabot sur le sol, la ferrure doit se déformer sous l'effet de la force d'appui du membre. Le produit de cette force par la déformation engendrée au niveau de la ferrure exprime l'énergie absorbée par celle-ci. Un matériau de faible raideur absorbe évidemment davantage d'énergie qu'un matériau parfaitement rigide. Ensuite, l'élasticité du matériau ainsi comprimé détermine la part d'énergie qui sera restituée au pied. Les ferrures susceptibles d'amortir l'impact doivent absorber l'énergie cinétique du pied très rapidement et n'en restituer qu'une faible part. L'énergie cinétique absorbée engendre des déformations, des frottements et l'usure des matériaux, avant d'être dissipée en partie sous forme de chaleur.

L'intensité du choc encaissé par le sabot dépend avant tout du matériau de la ferrure qui heurte en premier le sol. Plus il est raide et plus le choc est brutal. Ainsi le sabot nu et les matières plastiques en polyuréthane qui constituent les fers N° 9, 11 et 12 permettent de réduire l'amplitude maximale du choc par rapport au fer en acier posé seul. La ferrure N°11 qui comporte une épaisse semelle d'usure en polyuréthane parvient à réduire de 56% le choc par rapport au fer en acier. La résonance de la ferrure est fonction de la racine carré du rapport entre sa masse et sa raideur à la compression. Cette loi explique la plus grande résonance des ferrures incluant le fer en acier à la fois plus raide et plus lourd que les autres fers. Le fer N°10 en alliage d'aluminium amortit mieux le choc que l'acier et surtout vibre moins que ce dernier car cet alliage est à la fois moins raide et plus léger que l'acier. Parmi les plaques testées, peu ont une grande efficacité pour réduire le choc lorsqu'elles sont associées à un fer en acier. Toutefois, la plaque N°3 atténue vite les vibrations consécutives au choc. La plaque de cuir N°5 est celle qui amortit le mieux le choc mais les propriétés mécaniques de ce matériau se détériorent très rapidement après quelque temps de pose. Le tassement qui intervient au cours des cycles de compression amenuise rapidement l'efficacité initiale de ce matériau organique.

## CONCLUSION

En pratique, les ferrures amortissantes ont un réel intérêt pour limiter les effets néfastes des forces vibrantes de hautes fréquences qui surviennent lors de l'impact du sabot sur le sol. Leur emploi à titre préventif est particulièrement indiqué chez les chevaux exposés à des chocs intenses et répétés. Il s'agit des chevaux qui se déplacent sur des terrains durs, des chevaux de course dont les sabots heurtent le sol avec une énergie cinétique élevée et enfin des chevaux de saut d'obstacles qui, à l'appel comme à la réception, sont exposés à ces sollicitations mécaniques néfastes. Leur utilisation à long terme doit permettre de limiter une usure ostéo-articulaire d'apparition souvent trop précoce dans la carrière des chevaux. Toutefois, il convient de rappeler que le travail des chevaux sur une piste confortable minimise largement l'amplitude des chocs. Ainsi, la maîtrise des propriétés amortissantes du sol, lorsqu'elle est possible, doit être envisagée en priorité ou en association avec l'amélioration de la ferrure. Parmi les ferrures actuellement disponibles sur le marché, cette étude montre que peu ont de réelles propriétés amortissantes. L'association des meilleures plaques et des meilleurs fers permet toutefois de confectionner des ferrures déjà beaucoup plus confortables que le simple fer traditionnel. Par ailleurs, la grande diversité de matériaux polymères visco-élastiques devrait conduire prochainement à des progrès en matière de ferrure amortissante.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

BARREY E. (1990 a). Contribution à l'optimisation de la locomotion du cheval-athlète : analyse expérimentale et statistique des interactions biodynamiques pied-ferrure-piste, Thèse doctorale N°90 ENAM 0004, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.

BARREY E., LANDJERIT B., WOLTER R. (1990 b). Shocks and vibrations during the impact of the hoof on different track surfaces, 3rd International Conference on Equine Exercise Physiology, 15-19 Juillet 1990, Uppsala, Suède.



BARREY E. (1990 c), Investigation of the vertical hoof force distribution in the equine forelimb with an instrumented horseboot, *Equine Vet. J. Suppl.* 19, Exercise Physiology, 35–38.

DALIN G., JEFFCOTT L.B. (1985), Locomotion and gait analysis, *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 1(3), Dec 85.

DRONKA T., VALAT B. (1989), Contribution à l'étude accélérométrique des allures du cheval, Thèse de doctorat vétérinaire, Alfort 1989. GOT C. (1987), Les chaussures de sport, *La Recherche* 18(191), 1020–1027.

JORGENSEN U. (1989), Implication of heel strike – an anatomical, biomechanical, physiological and clinical study with focus on the heel pad, PhD Thesis, Linköping, Suède.

KINGSBURY H.B., QUDDUS M.A., ROONEY J.R., GEARY J.E. (1978), A laboratory system for production of flexion rates and forces in the forelimb of the horse, *Am. J. Vet. Res.* 39(3), 365–369.

LIGHT L.H., Mc LELLAN G.E., KLENERMAN L. (1980), Skeletal transients on heel strike in normal walking with different footwear, *J. Biomech.* 13, 477–480.

NIGG B.M. (1983), External force measurements with sport shoes and playing surfaces, *Proc. Int. Symp. Biomechal aspects of sport shoes and playing surfaces*, Calgary.

NIKI Y., UEDA Y., YOSHIDA K., MASUMITSU H. (1982), A force plate study in equine biomechanics 2: the vertical and fore–aft components of floor reaction forces and motion of equine's limbs at walk and trot, *Bull. of Equine Res. Instit., Japan racing association* N°19, 1–17.

PRATT G.W. (1984), Racing surfaces – A survey of mechanical behavior, *Am. Ass. Equine Pract.* 30, 321–331.

PRATT G.W., O'CONNOR J.T. (1976), Force plate studies of equine biomechanics, *Am. J. Vet. Res.* 37, 1251–1255.

ROONEY J.R. (1981), *The mechanics of the horse*, Huntington, R.E. Kriger, New York.

ROONEY J.R., QUDDUS M.A., KINGSBURY H.B. (1978), A laboratory investigation of the function of the stay apparatus of the equine foreleg, *J. Equine Med. Surg.*, 2, 173–180.

SIMON S.R., PAUL I.L., MANSOUR J., MUNRO M., ABERNETHY P.J., RADIN E.L. (1981), Peak dynamic force in human gait, *J. Biomech.* 14, 817–822.

UEDA Y., NIKI Y., YOSHIDA K., MASUMITSU H. (1981), A force plate study of equine biomechanics : floor reaction force of normal walking and trotting horses, *Bull. Equine Res. Instit., Japan racing association* 18, 28–41.

VANSCHPDAEL P. (1988), Le point sur le fer Springtop, *Infor–maréchalerie* 14, 10–13.

VASKO K.A., FARR A. (1984), A visco–elastic polymer as an aid in injury management and prevention in equine athletes, *Olympic scientific congress, Sports medicine section*, July 17–26, Eugene Oregon.

VINDRIIS M.S. (1990), Construction et fabrication du système de ferrure de haute technologie Sleipner Sport, *Infor–Maréchalerie* vol.2, N°1.