

Effets biomécaniques des sols sur l'appareil locomoteur du cheval

Par : **N. Crevier-Denoix, H. Chateau, F. Munoz-Nates, B. Ravary-Plumioen, M. Camus, S. Falala, J.-M. Denoix et P. Pourcelot**

Unité INRA-ENVA 957 Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval (BPLC), Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, France

Dans le domaine des courses comme dans celui de l'équitation de loisir ou de sport, les sols équestres rencontrés sont variés. Ils diffèrent à la fois par leur nature (herbe, terre, sables, fibrés ou non, ...) et par la structure de leur construction (1).

L'objectif de cet article est de présenter les principales caractéristiques de l'interaction du pied d'un cheval avec le sol au cours de la locomotion. La structure de la piste, en particulier la nature et l'épaisseur de la couche de travail, et plus généralement les caractéristiques du ou des matériaux présents jusqu'à 15 à 20 cm de profondeur, influent sur cette interaction. La description synthétique qui suit ne peut envisager toutes les situations (voir encadré N°1) ; elle a simplement pour ambition d'expliquer les grands principes de l'interaction pied-sol. Cet article s'appuie pour cela sur les résultats des expérimentations menées dans le cadre des projets successifs Sequisol (2007-2010) et SafeTrack (2012-2015), co-financés par l'IFCE.

Les effets biomécaniques des sols sur l'appareil locomoteur du cheval évoluent au cours de la phase d'appui (pendant laquelle le pied est au sol). Il convient de distinguer 6 périodes :

- 1. l'impact, qui fait suite au poser,*
- 2. le freinage,*
- 3. l'extension des articulations intermédiaires,*
- 4. la mise en charge verticale maximale,*
- 5. la propulsion,*
- 6. le décolllement des talons, qui précède le lever.*

Impact

Selon la façon dont le pied se pose (en talon, à plat, ou - plus rarement - en pince), le choc de l'impact est plus ou moins précoce et brutal (le pic d'impact survient lorsque toute la surface du pied est en contact avec le sol). Il a généralement lieu dans les 5 à 10 premières millisecondes de l'appui (cf. A, Figures 1 et 2), plus tardivement sur le pied postérieur, dont la trajectoire est plus tangentielle au sol, que sur l'antérieur. Ce choc correspond à la collision passive entre la partie distale du membre et la surface ; il est caractérisé par la **décélération verticale maximale** du pied, ou pic d'impact (exprimé en $m.s^{-2}$; $9,81 m.s^{-2} = 1 G$). L'impact engendre des vibrations dont l'énergie est globalement proportionnelle au pic de décélération. De toutes les variables biomécaniques pouvant être mesurées, c'est la plus sensible aux propriétés de la **surface** du sol (2). Les valeurs mesurées varient considérablement selon les sols et les disciplines : d'environ $-300 m.s^{-2}$ à la réception d'un obstacle (1,2 m) sur un sable fibré fraîchement hersé, à $-6000 m.s^{-2}$ chez un trotteur à 40 km/h sur une piste excessivement dure. D'après nos résultats, **$-4000 m.s^{-2}$** constitue une valeur-seuil de risque pathogène pour le cheval.

(1) Structure d'une piste

Au sein d'une piste ou d'une carrière, on distingue la couche superficielle, dite « couche de travail », dont la souplesse doit permettre au pied du cheval une certaine liberté de mouvement, et la couche de fondation, plus ferme, qui assure la portance et parfois aussi le drainage de la couche de travail. Une couche intermédiaire s'interpose éventuellement entre la fondation et la couche de travail ; elle a pour but d'éviter les remontées de cailloux de la fondation vers la couche de travail et inversement, la descente de la couche de travail. L'ensemble est placé sur un terrain naturel préalablement décaissé et compacté, voire traité, que l'on appelle « fond de forme ».

La couche de travail fait généralement au moins 8 cm d'épaisseur, le plus souvent entre 10 et 15 cm. La fondation se trouve à 15 à 20 cm de la surface. En général, 25 à 30 cm séparent la surface de la piste du fond de forme.

Le choc de l'impact est particulièrement sensible à la **préparation** de la surface : sur une piste en sable, en terre ou en machefer, il est divisé par facteur 2 à 3 après hersage. Cette variable caractérise essentiellement la **fermeté « superficielle » de la piste**. Dans une expérimentation (au galop) où nous avons comparé 3 épaisseurs de couche de travail (en micro-sable fibré), ce choc s'est révélé significativement accru lorsque l'épaisseur de cette couche est réduite de 13 à 7 cm ; mais à l'inverse, la réduction du choc n'est pas significative lorsque l'épaisseur passe de 13 à 20 cm. Ainsi, au-delà de 13 cm, l'épaisseur de la couche de travail n'a plus d'effet significatif sur le choc de l'impact. Certaines pistes peuvent par ailleurs générer des pics d'impact similaires, tout en ayant une fermeté « en profondeur » bien différente (3) (voir aussi paragraphe 4 ci-dessous).

Les effets pathogènes potentiels de l'impact sont à notre avis limités, car cet événement n'implique que l'extrémité distale du membre (pied ± paturon), à un moment où la charge appliquée sur le membre est très faible. En outre, les vibrations engendrées par l'impact ne sont quasiment plus détectables proximale au boulet (4). On peut néanmoins s'interroger sur le lien entre les décélérations maximales très fortes mesurées sur les pistes de trot (la plupart du temps beaucoup plus fermes que dans les autres disciplines) et la fréquence des fractures de troisième phalange chez le trotteur, ou encore sur le rôle des vibrations associées à l'impact, dont l'énergie est accrue sur une surface dure, dans la genèse de certaines tendinopathies (fléchisseur superficiel du doigt en particulier).

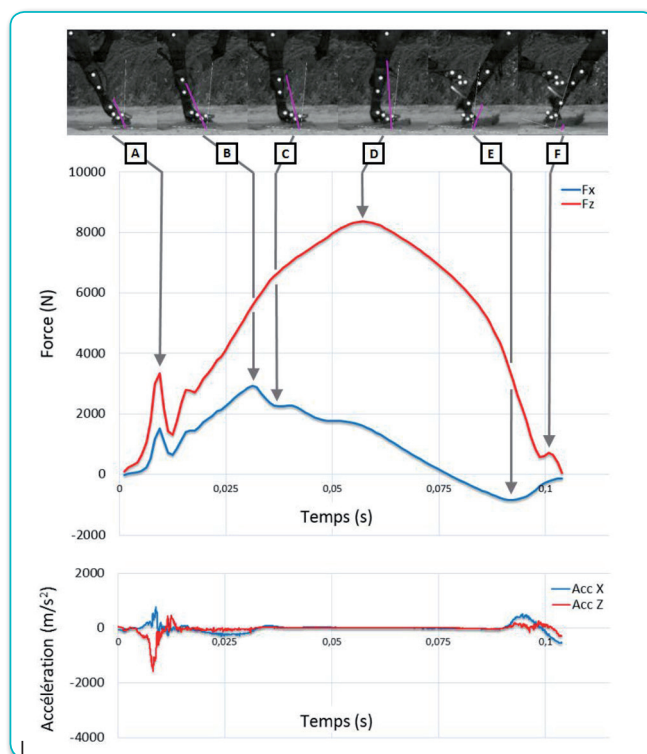


Figure 1 / Force et accélération mesurées sous le pied d'un trotteur à 40 km/h, sur une **piste souple**. Les composantes longitudinale (X) et verticale (Z) de la force et de l'accélération sont tracées séparément, en fonction du temps. Les différentes périodes de l'appui sont caractérisées par des événements clefs :
 A, pic d'impact ;
 B, fin du freinage (Fx max) ;
 C, extension inter-phalangienne proximale ;
 D, force verticale maximale (Fz max) ;
 E, force maximale de propulsion (Fx min) ;
 F, décollement des talons.

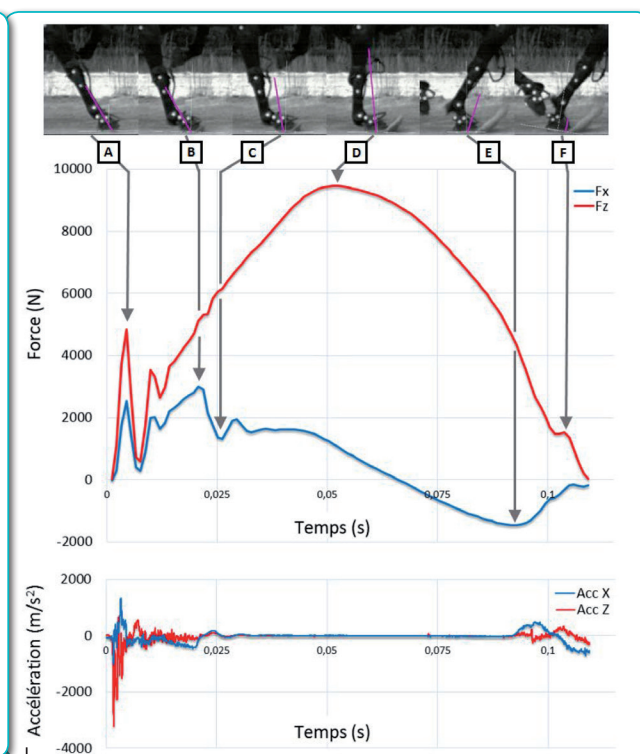


Figure 2 / Force et accélération mesurées sous le pied d'un trotteur à 40 km/h, sur une **piste dure**. Mêmes légendes que pour la figure 1.

Par comparaison aux tracés de la figure 1 (piste souple), ceux obtenus sur une piste dure présentent des pics de plus grande amplitude, et qui surviennent plus tôt.

Freinage

Au cours de cette seconde phase, le pied glisse vers l'avant, tout en s'enfonçant plus ou moins dans le sol, selon les propriétés de celui-ci. Le déplacement vers l'avant du tronc du cheval, qui entraîne avec lui la partie proximale du membre, a pour effet d'accroître la composante verticale de la force (F_z) appliquée sur le membre. Au-delà d'un certain niveau de F_z , **l'avancée du pied est stoppée**, et la composante longitudinale de la force (F_x), qui ne cessait de croître jusque là, commence à décroître. Le freinage est ainsi caractérisé par l'accroissement rapide de la F_x jusqu'à un maximum qualifié de « force maximale de freinage » ($F_x \text{ max}$; cf. B, Figures 1 et 2). Les valeurs classiquement mesurées pour cette force vont de 1500 à 3000 N (9,81 N = 1 kg).

La force maximale de freinage est très sensible aux propriétés de la couche de travail (5). Elle est d'autant plus faible, et atteinte plus tardivement, que la surface est plus meuble ou déformable. La pente du tracé F_x -temps synthétise cette information et permet de caractériser le freinage. Cette variable est par exemple **divisée par 1,5** en moyenne sur un sable fibré **après hersage** (vs. après compactage), à la réception d'un obstacle. D'une façon générale, plus le déplacement du pied dans le sol est grand, plus la mise en charge du membre est progressive. Toutefois, un freinage long peut être défavorable à la performance, car il prolonge d'autant la durée de l'appui (un sol est d'autant plus « rapide » que la durée de l'appui, rapportée à la durée totale de la foulée, est courte). Ceci est observé lorsque le pied s'enfonce nettement dans la surface, parallèlement à son déplacement longitudinal.

Extension des articulations intermédiaires

Cette phase n'avait jamais été décrite en tant que telle jusqu'ici. C'est grâce à la combinaison de mesures dynamiques et cinématiques qu'elle a pu être identifiée par notre équipe comme une étape-clef à part entière, sur laquelle la nature du sol a une influence forte. Au cours de cette phase, **l'articulation inter-phalangienne proximale** (AIPP), en flexion depuis le poser, se met en extension, et le **carpe** subit son pic d'extension maximale.

Juste après l'immobilisation longitudinale du pied (synchrone de la $F_x \text{ max}$, soit vers 20 % de l'appui), la **descente du boulet** provoque le recul du centre des pressions (point d'application de la force de réaction du sol), qui a pour effet de comprimer les talons.

Parallèlement, l'extension rapide du boulet accroît la tension du **tendon fléchisseur superficiel du doigt** (FSD ou perforé), qui à son tour provoque l'extension de l'AIPP (6). Ce mouvement, qui entraîne une légère avancée du pied (ressaut), se traduit par une inflexion, suivi d'un pic, sur le tracé de la F_x (cf. C, Figures 1 et 2) (7). Cet événement se manifeste également par un « rebond » sur le tracé accélérométrique longitudinal (accélération positive), qui fait suite au pic de décélération synchrone de la $F_x \text{ max}$.

L'extension inter-phalangienne proximale est plus brutale sur le membre postérieur que sur l'antérieur, et dans les deux cas, **elle l'est d'autant plus que la surface est ferme**.

En effet, sur les surfaces meubles ou déformables, l'enfoncement des talons dans la couche de travail sous l'effet de la descente du boulet réduit non seulement la compression des talons mais aussi la vitesse avec laquelle le tendon FSD est mis en tension. Même si le risque pathogène lié à cette phase n'est pas encore précisément établi, il est vraisemblable qu'une extension inter-phalangienne proximale trop brutale affecte les articulations adjacentes, en particulier le boulet.

Sur le membre antérieur, c'est aussi durant cette phase que le carpe connaît son pic d'extension maximale, qui survient donc bien avant la force verticale maximale (soit vers 30% de l'appui, contre 50% environ pour F_z max). Au galop, la vitesse maximale d'extension du carpe s'est révélée significativement plus élevée sur du gazon que sur une PSF (piste en sable fibré) (8).

Mise en charge verticale maximale

L'articulation inter-phalangienne proximale, le boulet et le carpe, sont à présent en extension, et l'orientation de la force de réaction est proche de la verticale. Au moment où sa composante verticale (F_z) atteint son maximum - soit environ 1,5 à 2 fois le poids du corps dans les conditions sportives - la force de réaction est encore orientée légèrement vers l'arrière (phase d'amortissement) sur les antérieurs (cf. D, Figures 1 et 2), tandis qu'elle se dirige déjà vers l'avant sur les postérieurs (phase de propulsion).

La vitesse de mise en charge verticale du membre (pente du tracé F_z -temps), pour les valeurs de F_z élevées, est une variable très sensible aux propriétés du sol « comprimé ». Elle traduit la capacité qu'a encore, ou non, le sol à se déformer verticalement sous la poussée des membres : plus le sol a été compacté par les phases initiales de l'appui, plus sa capacité résiduelle de déformation est faible et plus la vitesse de mise en charge verticale est élevée. Inversement, la F_z max est atteinte d'autant plus tardivement (donc la pente est plus faible) que le sol est moins compactable. Les PSF (cirées ou non), qui sont des sols peu compactables, se traduisent par des F_z max et des pentes F_z -temps réduites par rapport aux surfaces traditionnelles (3). La comparaison de 7, 13 et 20 cm d'épaisseur de couche de travail (en micro-sable fibré) montre que la diminution des pentes F_z -temps est significative non seulement lorsqu'on passe de 7 à 13 cm, mais aussi de 13 à 20 cm. Par ailleurs, nous avons comparé deux planches d'essai recouvertes d'une même couche de travail (en sable fibré) mais reposant sur des sous-couches de dureté différente. Même sous une couche de travail de 12,5 cm, et à vitesse modérée (trot à 30 km/h), une sous-couche « dure » engendre des pentes F_z -temps, pour des forces supérieures à 6000 N, significativement plus élevées qu'une sous-couche « souple » (9). Notons que le pic d'impact n'est pas significativement différent entre ces deux conditions. Ces expérimentations prouvent que la vitesse de mise en charge verticale maximale d'un membre de cheval est conditionnée par les propriétés du sol sur une profondeur qui va au-delà des 13 premiers centimètres.

En termes d'accidentologie sévère (ex. : fracture des os longs), **la vitesse de mise en charge verticale, et a fortiori la F_z max**, qui traduisent la fermeté « en profondeur » de la piste, **sont des variables clefs**. Il est à noter que ces variables évoluent de façon directement proportionnelle à la **vitesse du cheval**, celle-ci constituant par ailleurs le facteur de risque N°1 d'accident.

(2) Importance de la préparation de la piste

Sur une même carrière en sable fibré, selon que la piste a été fraîchement hersée ou qu'elle a été compactée (passage d'un rouleau), les contraintes biomécaniques sur les membres sont significativement différentes. Par exemple, sur le membre antérieur directeur (ex. : antérieur droit lorsque le cheval galope à droite), à la réception d'un obstacle d'1,20 m, la piste compactée provoque l'accroissement des variables suivantes, par rapport à la même piste hersée :

- choc de l'impact : environ 50% ;
- freinage (pente du tracé force longitudinale-temps) : environ 50% ;
- mise en charge verticale maximale (pente du tracé force verticale-temps) : 17 % ;
- force verticale maximale : environ 5%.

Le simple passage répété d'un grand nombre de chevaux toujours aux mêmes endroits sur une piste a le même effet que le rouleau. Il est donc impératif de herser régulièrement une piste lorsque celle-ci est utilisée intensivement.

Propulsion

Pendant cette phase, la force longitudinale F_x est par définition négative (cf. E, Figures 1 et 2). La propulsion débute plus tôt sur le postérieur, parallèlement à l'extension du jarret, que sur l'antérieur. Lors de la propulsion, le sol a déjà été **compacté par les étapes précédentes de l'appui**. Un sol qui offre un bon support engendre une F_x min élevée (en valeur absolue),

associée à une durée de propulsion courte. Un sol profond entraîne un effort propulsif supplémentaire, fourni principalement par les postérieurs, avec une F_x min plus tardive, et une durée relative de l'appui accrue. Un sol profond étant par ailleurs associé à un retard à l'élévation du boulet lors de la propulsion, parallèlement à la bascule du pied en pince (10), il est **contre-indiqué lors de tendinopathie du tendon FSD ou du ligament suspenseur du boulet** (11).

Décollement des talons

Le décollement des talons, vers 95 % de l'appui, entraîne un petit pic de F_z (cf. F, Figures 1 et 2). Celui-ci est plus élevé sur les sols fermes qui permettent peu, ou pas, la bascule du pied en pince, ainsi que sur les sols profonds, qui nécessitent un effort supplémentaire pour relever les talons alors que le pied est « enchâssé » dans le sol. Ce pic, qui traduit la traction assurée par le **tendon fléchisseur profond du doigt** (FPD ou perforant), responsable de l'antéversion du pied (bascule de la pince), est plus discret sur les sols souples. Ces derniers sont donc à privilégier chez les chevaux souffrant de l'appareil podotrochléaire (os sésamoïde distal, ligaments associés, tendon FPD, bourse podotrochléaire, ...) ou de la bride carpienne (ligament accessoire du tendon FPD) (12).

Il est possible aujourd'hui de mesurer les effets biomécaniques des sols dans les conditions de l'exercice sportif. La combinaison de mesures dynamiques et cinématiques a permis de mieux comprendre les contraintes qui s'exercent sur les membres, et la façon dont le sol, par ses propriétés, peut diminuer ou augmenter ces contraintes.

Le « sol idéal », convenant à toutes les situations, n'existe pas, et il est d'ailleurs recommandé de ne pas cantonner les chevaux à un seul type de surface. Il est toutefois possible de choisir ou d'adapter un sol – via les matériaux utilisés et peut-être plus encore, via la préparation et l'entretien – selon la discipline, l'objectif visé (compétition, entraînement, instruction, ...), et le cheval lui-même (prévention ou réhabilitation d'affections de l'appareil locomoteur).

Remerciements

Ces travaux sur les pistes ont été soutenus par la Région Basse-Normandie, le FEDER, l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation, le Fonds Eperon. Principaux partenaires : entreprises Normandie drainage et Toubin & Clément, J.-M. Monclin (Ecuries du Clairay), CIRALE. Autres participants : S. Blondeau, D. Robin, L. Holden, J. Martinot, M. Pouchard, A. Van Hamme, L. Desquilbet.

Nous tenons également à remercier les personnes et organismes qui ont mis à notre disposition leurs chevaux ou leurs pistes pour ces mesures : C. Walazyc (domaine de Grosbois, Le Trot), G. Ribot (hippodromes de Cabourg et de Caen, Le Trot), Y. Deshayes (hippodrome de Deauville-la-Touques, France Galop), J. Souloy (Haras de Ginai), Haras du Pin (IFCE), Y. Giquel (Haras de la Bourdonnerie), Ecole des Courses Hippiques de Gaignes, J.-P. et V. Viel (Haras de Canteloup), E. Szirmay, J.-P. Vilault, E. Foissier, Garde Républicaine de Paris, Centre Sportif d'Équitation Militaire de Fontainebleau, Ecole Nationale d'Équitation-Saumur. Merci enfin au Conseil des Chevaux de Basse-Normandie et au Pôle de compétitivité Hippolia pour leur soutien.

Pour aller plus loin

1. Crevier-Denoix N. (2015) Concevoir les sols. Grand livre du Cheval. Hachette Livre. 330-333.
2. Chateau H., Robin D., Falala S., Pourcelot P., Valette J.-P., Ravary B., Denoix J.-M. and Crevier-Denoix N. (2009) Effects of a synthetic all-weather waxed track versus a crushed sand track on 3D acceleration of the front hoof in three horses trotting at high speed. *Equine Vet. J.* 41, 247-251.
3. Crevier-Denoix N., Pourcelot P., Holden-Douilly L., Camus M., Falala S., Ravary-Plumioen B., Vergari C., Desquilbet L. and Chateau H. (2013) Discrimination of two equine racing surfaces based on forelimb dynamic and hoof kinematic variables at the canter. *Vet J.*, 198, suppl 1, 124-129.
4. Gustås P., Johnston C., Roepstorff L., Drevemo S. (2001) In vivo transmission of impact shock waves in the distal forelimb of the horse. *Equine Vet. J. Suppl.* 33, 11-15.
5. Robin D., Chateau H., Pacquet L., Falala S., Valette J.-P., Pourcelot P., Ravary B., Denoix J.-M. and Crevier-Denoix N. (2009) Use of a 3D dynamometric horseshoe to assess the effects of an all-weather waxed track and a crushed sand track at high speed trot: Preliminary study. *Equine Vet. J.* 41, 253-256.
6. Denoix J.-M. (1994) Functional anatomy of tendons and ligaments in the distal limbs (manus and pes). *Veterinary Clinics of North America - Equine Practice* 10, 273-322.
7. Crevier-Denoix N., Pourcelot P., Ravary B., Robin D., Falala S., Uzel S., Grison A.-C., Valette J.-P., Denoix J.-M. and Chateau H. (2009) Influence of track surface on the equine superficial digital flexor tendon loading in two horses at high speed trot. *Equine Vet. J.* 41, 257-261.
8. Crevier-Denoix N., Falala S., Holden-Douilly L., Camus M., Martino J., Ravary-Plumioen B., Vergari C., Desquilbet L., Denoix J.-M., Chateau H. and Pourcelot P. (2013) Comparative kinematic analysis of the leading and trailing forelimbs of horses cantering on a turf and a synthetic surface. *Equine Vet. J.*, 45, S1, 54-61.
9. Munoz-Nates F., Pourcelot P., Ravary-Plumioen B., Dardillat C., Denoix J.-M., Chateau H., Crevier-Denoix N. (2016) Comparison of track surfaces with two different foundations: effects on the dynamic variables measured in one harness horse at a training trot. *Equine Vet. J.* 48, Suppl. 49, 38.
10. Crevier-Denoix N., Robin D., Pourcelot P., Falala S., Holden L., Estoup P., Desquilbet L., Denoix J.-M., Chateau H. (2010) Ground reaction force and kinematic analysis of limb loading on two different beach sand tracks in harness trotters. *Equine Vet. J.* 42. Suppl. 38, 544-551.
11. Crevier-Denoix N., Ravary-Plumioen B., Vergari C., Camus M., Holden-Douilly L., Falala S., Jerbi H., Desquilbet L., Chateau H., Denoix J.-M. and Pourcelot P. (2013) Comparison of superficial digital flexor tendon loading on asphalt and on deep sand in horses at the walk and trot. *Vet. J.*, 198, Suppl 1, 130-136.
12. Denoix J.-M. (2012) Tour d'horizon sur le syndrome naviculaire; les pièges à éviter. In: *Proceedings, 12e Congrès de médecine et de chirurgie équine, Genève*, 161-182.