



Les effets biomécaniques des sols sur l'appareil locomoteur du cheval

La qualité des pistes conditionne la locomotion du cheval et peut être un facteur de risque de lésions ostéoarticulaires et tendineuses. Dans le cadre d'un programme de recherche intitulé « Sequisol » (Sécurité - Equidés - Sol), un protocole expérimental complet couplant des mesures dynamométriques, accélérométriques et cinématiques, a été mis au point pour caractériser les effets des sols équestres sur l'appareil locomoteur et la locomotion de chevaux de course et de sport, dans les conditions de l'entraînement.

par [Nathalie CREVIER-DENOIX](#) - | 01.10.2011 |



Niveau de technicité :



Protocole utilisé

Le protocole, appliqué chez le trotteur attelé puis chez le cheval monté (cf. figure 1), est basé sur l'utilisation simultanée de différents instruments de mesure, en particulier :

- Un **fer dynamométrique 3D** [Chateau *et al.*, 2009^b] et un **accéléromètre 3D** fixés sur les pieds du cheval. Jusqu'en 2009, seul un pied antérieur était équipé ; depuis 2010, l'autre pied antérieur, ou l'un des pieds postérieurs, est aussi équipé simultanément ;
- Un capteur ultrasonore permettant d'estimer la **force dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt** (FSD) [Pourcelot *et al.*, 2005 ; Crevier-Denoix *et al.*, 2009^a et ^b] ;
- Une ou deux **caméras haute fréquence** (600 à 1000 Hz) ;
- Un dispositif pour mesurer la **vitesse du cheval** (GPS sur cheval monté).

Toutes les mesures sont synchronisées. Au cours des expérimentations, la vitesse du cheval est standardisée pour permettre la comparaison entre les pistes.

Ce protocole a été appliqué pour comparer environ 20 pistes (exemples : fibré-huilé, sable concassé, mâchefer, terre, sable de plage...) et pour évaluer les effets de certaines procédures d'entretien (hersage).

Tests sur le trotteur attelé

Les résultats présentés ici ont été obtenus avec un même cheval, testé à la même vitesse sur 8 pistes d'entraînement de trot et un chemin dur.

Instrument de mesure utilisés sur le trotteur attelé



Ces instruments, synchronisés entre eux, sont :

A - un fer dynamométrique tridimensionnel, muni de 4 capteurs de force triaxiaux, qui mesure la force de réaction au sol dans les 3 directions, les moments et la position du centre de pression ;

B - un accéléromètre triaxial, fixé sur la paroi du sabot, permettant de mesurer les décélérations (choc à l'impact) et les vibrations générées par ce choc ;

C - un capteur ultrasonore qui permet d'évaluer la force qui s'exerce dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt ;

D - des centrales de mesure inertielle (ou des accéléromètres). Disposés sur la ligne dorsale (et en particulier sur le garrot et la croupe), ces dispositifs permettent de quantifier la mobilité dorsale et les asymétries locomotrices (boiterie) ;

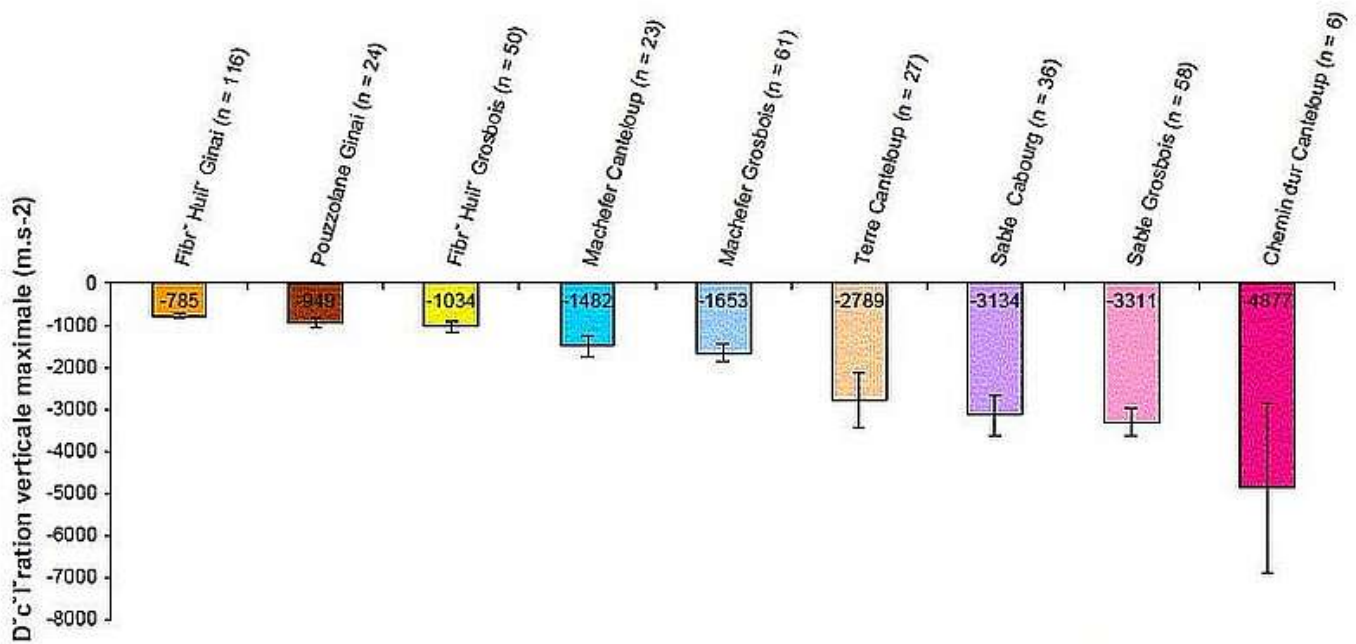
E - un système cinématique haute fréquence, permettant d'analyser les mouvements articulaires du membre, l'orientation et les glissements du sabot. La caméra haute fréquence est embarquée dans un véhicule qui suit le cheval en mouvement.

Choc de l'impact (décélération verticale maximale)

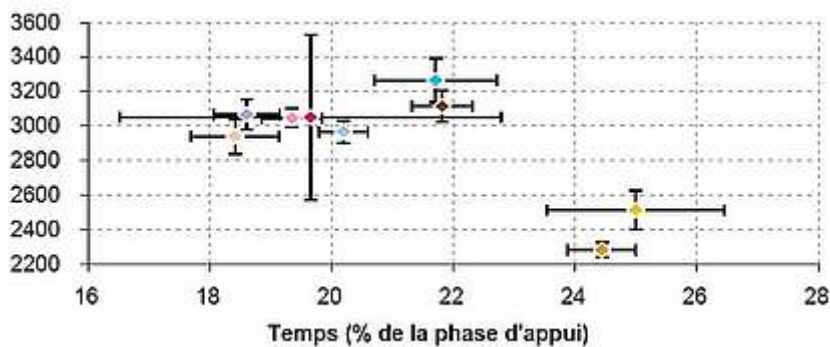
Parmi les 8 pistes d'entraînement, celles en sable fibré-huilé amortissent fortement le choc, tandis que les sables concassés apparaissent comme les surfaces d'entraînement les plus fermes.

Les mâchefers, dont les résultats se sont montrés très influencés par les conditions d'entretien, se présentent ici comme des surfaces intermédiaires. On peut noter le caractère très amortissant de la piste en pouzzolane testée (fortement hersée le jour du test).

Le chemin dur testé (chemin d'accès aux pistes, non hersé) se distingue nettement des pistes d'entraînement par l'intensité et la variabilité beaucoup plus élevées du choc de l'impact (décélération verticale maximale de près de 5000m/s², soit environ 500 fois l'accélération de la pesanteur) (cf. figure 2).



Force longitudinale maximale



La force longitudinale maximale (force horizontale en fin de glissement ou « de freinage ») s'est révélée très discriminante entre les sables fibrés huilés d'une part et tous les autres sols testés d'autre part (cf. figure 3).

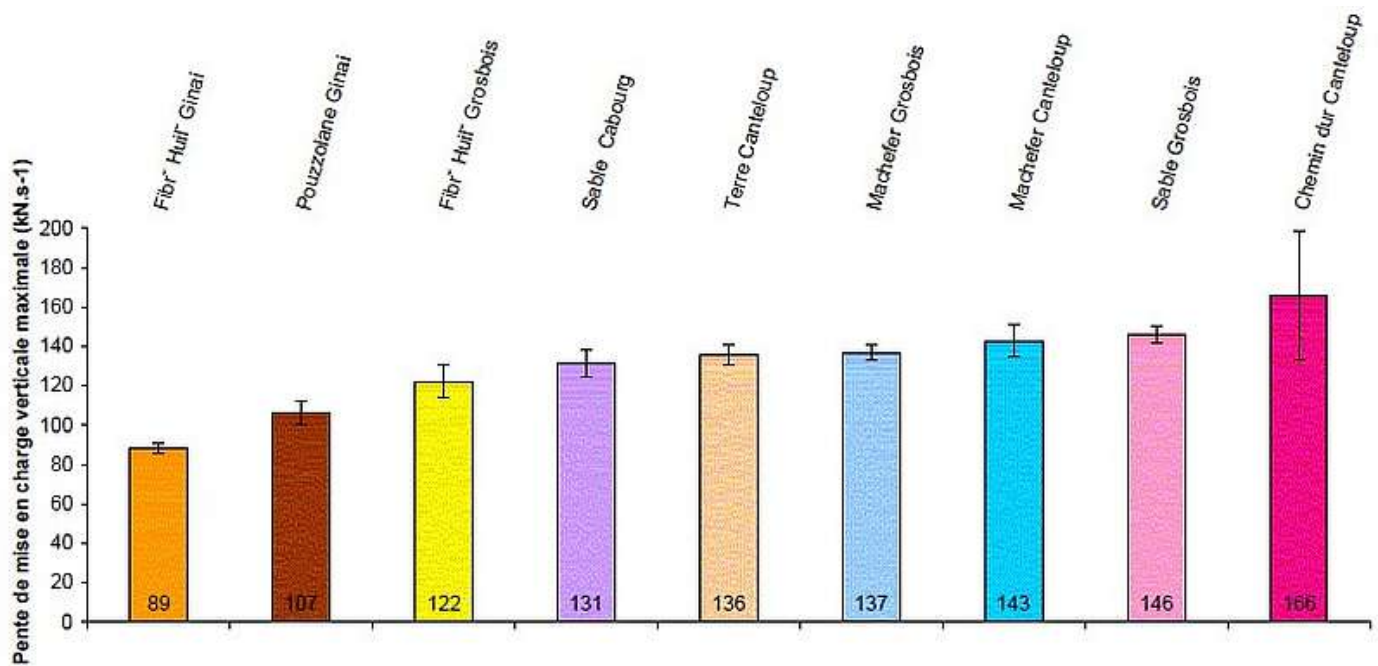
Sur les premiers, le pic de force est moindre (< 2800N) et survient de façon différée (autour de 25% de l'appui). Ce résultat a également été retrouvé plus tard sur les pistes de galop (cf. figure 6).

Un pic de force longitudinale différé traduit une immobilisation plus tardive du pied ; il implique une phase plus longue d'enfoncement et de glissement du pied dans le sol en début d'appui.

Vitesse de mise en charge maximale

La vitesse de mise en charge verticale maximale du membre lors de l'appui (pente du tracé force verticale-temps en fin d'amortissement) est probablement le critère le plus pertinent pour qualifier la notion de « risque de trauma » lié à un sol (cf. figure 4).

Là encore, le chemin dur se distingue nettement de toutes les pistes d'entraînement (avec une valeur moyenne de vitesse de mise en charge verticale maximale d'environ 16 tonnes par seconde). Les autres pistes d'entraînement sont assez proches les unes des autres, les fibrés-huilés et la pouzzolane apparaissant toutefois, là encore, plus amortissantes.



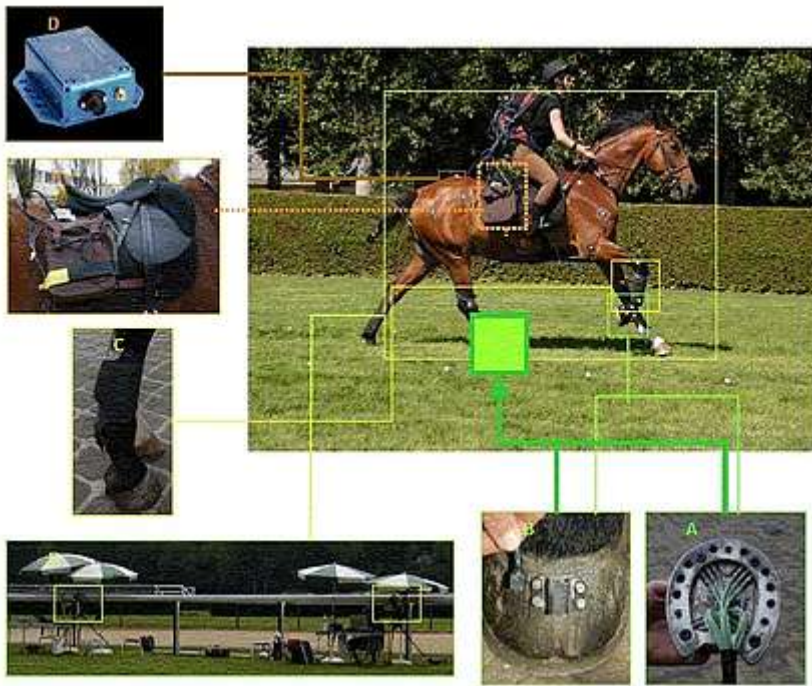
Tests sur cheval monté au galop

En 2009, le protocole expérimental a été adapté au cheval monté. 6 chevaux ont ainsi été testés au galop (30km/h, en ligne droite) sur l'hippodrome de Deauville-la-Touques. La PSF (piste en sable fibré huilé) a ainsi été comparée à la piste de course en gazon.

Outre les paramètres biomécaniques présentés chez le trotteur, de nouvelles variables ont été calculées grâce au perfectionnement du protocole d'analyse cinématique (*cf.* figure 5) et à celui du traitement des données accélérométriques et dynamométriques.

Les nouvelles variables ont trait, notamment, à la vitesse du pied au moment du poser, à son glissement et à son enfoncement au cours du freinage, ainsi qu'à l'orientation du pied et du membre dans son ensemble par rapport à la piste au cours de l'appui.

Instruments de mesure utilisés sur le cheval monté au galop



A - 2 fers dynamométriques 3D sont placés respectivement sur l'antérieur droit et le postérieur droit ;

B - 2 accéléromètres triaxiaux sont également fixés sur la paroi des deux sabots correspondants ;

C - un capteur ultrasonore permet d'évaluer la force qui s'exerce dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (de l'antérieur droit) ;

D - un système GPS, dont l'antenne est placée sur la croupe, permettant de mesurer la vitesse de déplacement du cheval ;

E - les dispositifs d'enregistrement sont disposés sur le dos du cheval et du cavalier ; leur contrôle est effectué à distance par liaison WIFI.

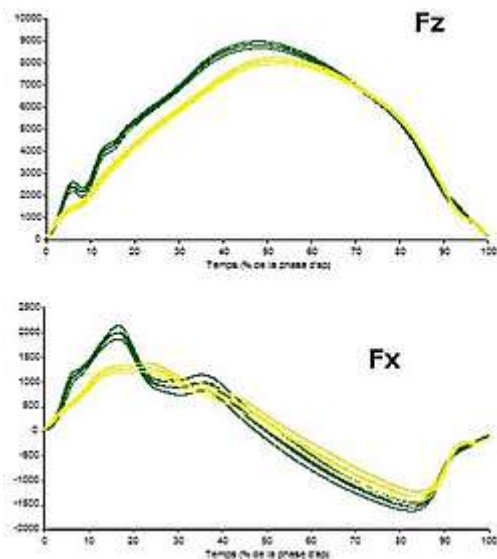
La piste est par ailleurs délimitée par des marqueurs cinématiques qui serviront à la calibration des mesures effectuées avec les 2 caméras haute fréquence, fixes et placées sur le côté de la piste.

Interaction pied-sol au début de l'appui

Les vitesses verticale et horizontale du pied à l'impact sont significativement supérieures sur le gazon, au galop à droite comme à gauche. Le choc vertical de l'impact est plus violent sur le gazon (valeur absolue du pic de décélération verticale significativement plus élevée).

Le délai avant immobilisation du pied est significativement plus long sur la PSF, et l'enfoncement vertical du pied entre l'instant de l'impact et l'immobilisation est significativement plus grand sur la PSF. Le pic de décélération horizontale (choc horizontal, en valeur absolue), le rebond qui suit l'immobilisation et la force longitudinale maximale (de freinage) sont significativement plus élevés sur le gazon.

Phase de mise en charge du membre



L'un des résultats les plus spectaculaires de cette étude est la différence de force verticale maximale exercée sous le pied du cheval au milieu de l'appui (réduction de près de 10% en moyenne sur la PSF par rapport au gazon - cf. figure 6).

En outre, la vitesse maximale de mise en charge verticale du membre (pente du tracé force verticale-temps) et l'impulsion verticale (aire sous la courbe du même tracé) sont aussi significativement plus faibles sur la PSF. On peut noter par ailleurs que le pic de force verticale est significativement plus tardif sur la PSF.

Figure 6 ⇒ comparaison entre :

- Gazon (tracés verts),
- PSF (tracés jaunes).

Galop à gauche (30km/h), le membre droit étant équipé

La PSF engendre un pic de Fz (force verticale maximale) et de Fx (force maximale « de freinage ») de moindre amplitude et plus tardif que sur le gazon.

Analyse cinématique

Les mesures cinématiques démontrent que la mise en charge du membre est plus progressive sur la PSF : les pics de vitesses angulaires maximales d'extension du boulet, du carpe et du coude, et de flexion inter-phalangienne et scapulo-humérale (épaule), sont significativement plus faibles sur la PSF dans la première moitié de l'appui. Pour les articulations distales, ces observations sont parfaitement cohérentes avec l'angle que fait le pied par rapport à la piste (plus grande variation de cet angle sur la PSF et notamment enfoncement des talons plus marqué dans la première moitié de l'appui).

Inversement, la propulsion semble moins efficace sur la PSF : lorsque le membre quitte le sol en fin d'appui, il est significativement plus vertical (moins oblique vers l'arrière) que sur le gazon, l'angle du boulet est moins ouvert, le coude est moins en extension.

Ce « retard relatif » des événements de l'appui sur la PSF persiste jusqu'au moment du décollement des talons (également significativement plus tardif, en % de la durée de l'appui, sur la PSF).

Résultats obtenus

Chez le trotteur attelé

Au bilan, chez le trotteur attelé, les paramètres biomécaniques qui sont apparus les plus discriminants sont : le choc vertical (décélération verticale maximale) du pied à l'impact, la force longitudinale maximale (force horizontale maximale en fin de glissement), le temps correspondant (c'est-à-dire le délai avant immobilisation du pied) et la vitesse de mise en charge verticale maximale du membre au cours de l'appui. Les pistes en sable fibré-huilé sont apparues significativement plus amortissantes : elles induisent une décélération maximale du pied à l'impact (choc), une force longitudinale maximale (force « de freinage », mesurée à la fin de la phase de glissement, quand le pied s'immobilise) et une vitesse maximale de mise en charge du membre et du tendon FSD, inférieures par rapport à des surfaces plus traditionnelles comme le sable concassé. Cependant, le pied met plus de temps à s'immobiliser dans le sol (phase de glissement-enfoncement plus longue), la longueur de foulée tend à être plus faible (et la fréquence de foulées plus élevée) et la durée relative de l'appui (ratio de la durée de l'appui sur la durée de la foulée) plus élevée aussi, ce qui peut être à l'origine du sentiment de pistes « plus lentes » / « moins performantes ».

Hersage et sous couche

Le hersage (sur des pistes en terre et en sable) réduit significativement le choc de l'impact (y compris les vibrations induites par le choc) ainsi que la force maximale de freinage. Il a également été démontré que la dureté de la sous-couche d'une piste (sous les 8 premiers cm) a un impact significatif sur la force verticale maximale (au milieu de la phase d'appui) ainsi que sur la vitesse de mise en charge verticale maximale des membres antérieurs au cours de l'appui.

Teneur en eau

L'influence de la teneur en eau du sable de plage sur les variables biomécaniques a été testée sur 4 trotteurs attelés, sur la plage de Varaville (Calvados). La comparaison d'un sable mouillé ferme (proche du rivage, teneur en eau d'environ 20% en moyenne) avec un sable mouillé profond (zone parallèle à la précédente, à une vingtaine de mètres, teneur en eau de 13,5% en moyenne), a entraîné plusieurs effets significatifs : diminution de la longueur des foulées, augmentation de la fréquence des foulées, et augmentation de la durée de l'appui (associée au raccourcissement de la phase de soutien) sont observés sur le sable mouillé profond, sur lequel le cheval s'enfonce davantage, par rapport au sable mouillé ferme. Le choc de l'impact, les forces en général (force maximale de freinage et force verticale maximale) et les vitesses de mise en charge correspondantes, sont moindres sur sable mouillé profond, confirmant le caractère amortissant de cette surface.

Toutefois, lors de la propulsion (vers 70 à 85% de l'appui), la tendance s'inverse et les forces longitudinale (de propulsion) et verticale sont plus élevées, probablement en raison d'une contraction accrue des muscles propulseurs du membre, requise du fait de la nature fuyante de ce sol profond. Cependant, cet effort accru se révèle moins efficace dans la mesure où l'articulation du boulet reste plus étendue en fin de propulsion (au cours des 25 derniers % de l'appui) sur le sable profond par rapport à un sable ferme, situation qui peut être considérée comme à risque pour le tendon FSD.

Chez le cheval monté au galop

Au bilan, ces premiers résultats au galop confirment le caractère amortissant des pistes en sable fibré-huilé (déjà démontré chez le trotteur).

Les formations anatomiques (os, tendons, articulations) de la partie distale du membre antérieur sont donc moins

sollicitées sur ce type de piste que sur une piste traditionnelle en gazon (testée ici en moyenne en condition de terrain « bon »), en particulier au cours de la phase d'amortissement. Cet effet est principalement dû à la déformation plus grande du sol. Toutefois, l'effort propulsif que doit fournir l'animal en fin d'appui est probablement accru, et manifestement moins efficace, que sur une piste en gazon.

C'est la première fois que des différences cinématiques significatives sur les angles articulaires et les vitesses angulaires sont démontrées entre ces deux types de pistes, parmi les plus utilisées dans le monde pour les courses de galop.

En effet, dans la seule autre étude qui a comparé la cinématique de chevaux au galop sur différentes pistes (gazon vs. dirt vs. PSF), nos collègues de la Faculté Vétérinaire de Davis (Californie, USA ; Setterbo *et al.*, 2008) ne sont parvenus à mettre en évidence que des différences de temporalité (confirmés d'ailleurs par nos travaux). Ce constat illustre la performance de notre protocole, et en particulier la résolution supérieure de nos mesures.

A l'obstacle

En 2010, les pistes du jumping de Cabourg ont été comparées lors d'une première expérimentation-test sur le saut d'obstacles (conditions testées : saut et virage serré).

Le protocole a été amélioré puis appliqué à la comparaison des pistes des 3 carrières du Pôle International du Cheval de Deauville fin octobre 2010.

L'analyse de cette expérimentation est en cours mais elle a déjà permis de confirmer les différences entre membres antérieur directeur et non-directeur, lors de la réception d'un obstacle (d'1m). La force verticale maximale et la vitesse de mise en charge maximale du membre non-directeur est plus élevée que celle du membre directeur ; le membre non-directeur contribue davantage à la propulsion que le membre directeur, dont la phase de freinage prédomine. En outre, les résultats préliminaires de cette étude montrent que la durée de l'appui et l'« impulsion » (aire sous la courbe du tracé de force) sont plus grandes sur le membre directeur, facteur à prendre en compte lors de l'examen de chevaux de saut d'obstacles boiteux ou non performants.

En savoir plus sur nos auteurs

- **Nathalie CREVIER-DENOIX** Professeur vétérinaire - Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA)

Bibliographie

- Page Internet : <http://www.vet-alfort.fr/web/fr/1122-sequisol.php>
- **CHATEAU H., HOLDEN L., ROBIN D., FALALA S., POURCELOT P., DENOIX J.M.** and **CREVIER-DENOIX N.**, 2010. Biomechanics of the equine foot during landing and the effects of track maintenance. XXVIIIth congress of the European Association of Veterinary Anatomists, Paris, 28-31 juillet 2010. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 39, page 273.
- **CHATEAU H., HOLDEN L., ROBIN D., FALALA S., POURCELOT P., ESTOUP P., DENOIX J.M.** and **CREVIER-DENOIX N.**, 2010. Biomechanical analysis of foot landing and stride parameters in harness

trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine vet. J.*, 42 (suppl. 38), pages 488- 495.

- **CHATEAU H., ROBIN D., FALALA S., POURCELOT P., VALETTE J.P., RAVARY B., DENOIX J.M., CREVIER-DENOIX N.**, 2009^a. Effects of a synthetic all-weather track versus a crushed sand track on 3D acceleration of the front hoof in three horses trotting at high speed. *Equine Vet. J.*, 41, pages 247-251.
- **CHATEAU H., ROBIN D., SIMONELLI T., PACQUET L., POURCELOT P., FALALA S., DENOIX J.M., CREVIER-DENOIX N.**, 2009^b. Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of 3D Ground Reaction Force on a moving horse. *J. Biomech.*, 42, pages 336-340.
- **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^a. Influence of track surface on the equine superficial digital flexor tendon loading in two horses at high speed trot. *Equine Vet. J.*, 41, pages 257-261.
- **CREVIER-DENOIX N., RAVARY-PLUMIOEN B., EVRARD D. and POURCELOT P.**, 2009^b. Reproducibility of a non-invasive ultrasonic technique of tendon force measurement, determined in vitro in equine superficial digital flexor tendons. *J. Biomech.*, 42, pages 2210-2213.
- **CREVIER-DENOIX N., ROBIN D., POURCELOT P., RAVARY B., FALALA S., VALETTE J.P., DENOIX J.M. and CHATEAU H.**, 2009^c. The Sequisol project: Biomechanical evaluation of the effects of equestrian track surfaces on the equine locomotor system. *Bull. Acad. Vét. France*, 162, pages 133-143.
- **CREVIER-DENOIX N., ROBIN D., POURCELOT P., FALALA S., HOLDEN L., DENOIX J.M. et CHATEAU H.**, 2010. Biomechanical effects of running on sand : ground reaction force in four harness trotters running on deep sand versus on asphalt. XXVIIIth congress of the European Association of Veterinary Anatomists, Paris, 28-31 juillet 2010. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 39, pages 276-277.
- **CREVIER-DENOIX N., ROBIN D., POURCELOT P., FALALA S., HOLDEN L., ESTOUP P., DENOIX J.M. and 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), pages 544-551.
- **POURCELOT P., DEFONTAINE M., RAVARY B., LEMATRE M. and CREVIER-DENOIX N.**, 2005. A non-invasive method for tendon force measurement. *J. Biomech.*, 38(10), pages 2124-2129.
- **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 and a crushed sand track at high speed trot. *Equine Vet. J.*, 41, pages 253-256.