

LE PROJET SEQUISOL : ÉVALUATION BIOMÉCANIQUE DE L'EFFET DES SOLS ÉQUESTRES SUR L'APPAREIL LOCOMOTEUR DU CHEVAL

THE SEQUISOL PROJECT : BIOMECHANICAL EVALUATION OF THE EFFECTS OF EQUESTRIAN TRACK SURFACES ON THE EQUINE LOCOMOTOR SYSTEM

Par Nathalie CREVIER-DENOIX⁽¹⁾, Damien ROBIN, Philippe POURCELOT, Bérandère RAVARY, Sylvain FALALA, Jean-Paul VALETTE, Jean-Marie DENOIX, Henry CHATEAU
(Communication présentée le 12 février 2009)

RÉSUMÉ

La qualité du sol conditionne la locomotion d'un cheval, et peut aussi être un facteur de risque de lésions ostéo-articulaires et tendineuses. Un protocole original de mesures biomécaniques a été mis au point afin de caractériser l'effet des sols sur l'appareil locomoteur et la locomotion, chez le trotteur attelé, dans les conditions de l'entraînement. Ce protocole repose sur l'utilisation simultanée d'un fer dynamométrique 3D, d'un accéléromètre 3D, d'un capteur ultrasonore de force dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (perforé), de centrales de mesure inertielle et d'une caméra haute fréquence. Trois chevaux trotteurs français ont été utilisés pour comparer deux pistes du centre d'entraînement de Grosbois (sable concassé et sable fibré-huilé); les mesures biomécaniques ont été effectuées à vitesse standardisée (9,7 m/s, soit 35 km/h). La piste en fibré-huilé présente des propriétés d'amortissement plus importantes que la piste en sable concassé: la décélération à l'impact, la force de freinage et la vitesse de mise en tension maximale du tendon perforé sont plus faibles. En revanche, le confort locomoteur du cheval, apprécié notamment par la longueur de la foulée, n'est pas supérieur. Le bilan préliminaire des tests réalisés depuis octobre 2006 dans le cadre du projet Sequisol (dix pistes testées sur cinq sites différents) confirme le caractère plus amortissant mais aussi plus « lent », lors du freinage, des pistes en fibré-huilé et, plus généralement, l'influence forte des conditions d'entretien des sols sur les résultats biomécaniques.

Mots-clés: cheval, sol, locomotion, force, tendon.

SUMMARY

The quality of ground surfaces conditions equine locomotion and can be a risk factor for osteoarticular and tendinous lesions. A novel protocol of biomechanical measurements has been developed to characterize the effects of ground surfaces on the locomotor system and locomotion of harnessed trotter horses under training conditions. This protocol is based on the simultaneous use of a 3D dynamometric horse-shoe, a 3D accelerometer, a superficial digital flexor (SDF) tendon force ultrasonic sensor, inertial measurement units, and a high-speed camera. Three French trotters were used to compare two tracks at the Grosbois training centre (crushed sand and all-weather waxed track); biomechanical measurements were performed at a standardized speed (9.7 m/s, i.e. 35 km/h). The all-weather waxed track appeared as the most damping (shock absorbing), i.e. lesser impact deceleration and braking force and lesser maximal loading rate of the SDF tendon. However, the horse's locomotor comfort (determined by the stride length) did not seem to be greater. The preliminary results of the tests performed since October 2006 as part of the Sequisol project (10 tracks tested on 5 different sites) confirm superior shock-absorbing properties as well as a "slower" characteristic during the braking phase for the all-weather waxed tracks, and generally speaking, the strong influence of maintenance conditions of the surfaces on the biomechanical results.

Key words: horse, ground surface, locomotion, force, tendon.

(1) UMR 957 INRA/ENVA Biomécanique et Pathologie Locomotrice du cheval, École Nationale vétérinaire, 7, Avenue du général de gaulle, 94704 Maisons-Alfort Cedex.

PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE

L'enjeu scientifique du projet Sequisol

Perçu depuis longtemps par les professionnels du cheval, le lien entre qualité des pistes et risque de lésions n'a été démontré scientifiquement qu'assez récemment. Les études épidémiologiques correspondantes, limitées à ce jour au secteur des courses de galop, n'apportent néanmoins que des informations très globales : par exemple, le risque est augmenté sur des pistes « dures » ou « fermes » par rapport à des pistes « souples » ; aux États-Unis, le risque est supérieur sur les pistes en « dirt » (type particulier de sable) à celui sur les pistes en herbe, ... (Cheney *et al.* 1973 ; Clanton *et al.* 1991 ; Mohammed *et al.* 1991 ; Bailey *et al.* 1998 ; Kobluk *et al.* 1998 ; Williams *et al.* 2001 ; Parkin *et al.* 2004 ; Pinchbeck *et al.* 2004 ; Henley *et al.* 2006). Par ailleurs, le facteur de risque potentiel « nature de la piste » est souvent difficile à analyser isolément ; il n'est pas indépendant d'autres facteurs tels que l'entretien de la piste, son site et son dessin, l'âge des chevaux (qui courent parfois préférentiellement sur une surface plutôt qu'une autre), et leurs antécédents pathologiques, le type d'entraînement, etc. (Wilson & Robinson, 1996).

Jusqu'ici, les effets directs de la nature du sol sur la locomotion et/ou sur les contraintes supportées par l'appareil locomoteur du cheval n'ont été que très partiellement étudiés. Plusieurs études ont porté essentiellement sur la phase initiale de l'appui, c'est-à-dire l'impact ; elles décrivent le choc du pied lors de son contact avec le sol au moyen d'accéléromètres (Barrey *et al.* 1991 ; Ratzlaff *et al.* 2005 ; Gustas *et al.* 2007). Les forces sous le pied du cheval ont parfois été mesurées (Ratzlaff *et al.* 1997 ; Kaï *et al.* 1999 ; Gustas *et al.* 2007). Tous ces travaux correspondent à des mesures isolées (effectuées sur ou sous le pied) et aucun n'a intégré parallèlement l'analyse de la locomotion dans son ensemble, par exemple par cinématique. Cette dernière technique n'a par ailleurs été utilisée pour évaluer l'effet des sols qu'à travers deux études (Burn & Usmar, 2004 ; Setterbo *et al.* 2008). Les seuls travaux menés dans des conditions proches de celles de l'entraînement l'ont été chez des galopeurs (Ratzlaff *et al.* 1997 ; Kaï *et al.* 1999 ; Ratzlaff *et al.* 2005 ; Setterbo *et al.* 2008), et **aucune étude à grande vitesse n'a été menée sur des trotteurs** ni sur des chevaux de sport.

Bien que les tendinopathies constituent une dominante pathologique chez le cheval de course, l'influence du sol sur les **contraintes tendineuses** n'a jamais été évaluée dans les conditions de l'exercice sportif, en raison de limites technologiques, aucune technique de mesure non-invasive n'étant disponible jusqu'à une époque récente (Ravary *et al.* 2004 ; Pourcelot *et al.* 2005 ; Ravary 2005 ; Crevier-Denoix *et al.* 2004, 2006, 2007 a, b). En outre, aucune étude n'a cherché jusqu'ici à quantifier le **confort locomoteur** du cheval, qui est pourtant un paramètre clef de la performance.

C'est dans ce contexte scientifique qu'a été conçu le projet Sequisol qui vise à caractériser – dans des conditions proches de celles de l'entraînement – les effets des sols équestres sur la

locomotion du cheval et sur les contraintes qui s'exercent sur son appareil locomoteur. La finalité de ce projet est de déterminer quelles doivent être les caractéristiques des sols pour une plus grande sécurité et un meilleur confort du cheval athlète.

L'enjeu socio-économique de Sequisol

Les accidents ternissent l'image des courses et des sports équestres aux yeux du grand public. Ils ont par ailleurs un impact économique lourd : les pertes de l'industrie des courses de pur-sang, dues aux affections locomotrices, ont été évaluées à un milliard de dollars par an aux États-Unis (Kobluk 1998).

Il n'existe, à l'heure actuelle au niveau international, **aucun référentiel technique** concernant les sols équestres, ni dans le cadre des courses hippiques ni dans celui des sports équestres, alors que de tels référentiels existent dans les principaux sports pratiqués chez l'Homme. Les professionnels du cheval sont démunis lorsqu'ils doivent définir ce qu'ils attendent des caractéristiques techniques d'un sol, concernant la sécurité, la performance ou le confort de l'athlète. Ils peuvent aussi difficilement les évaluer, par exemple avant une compétition ou en vue de la vérification de l'adéquation d'un sol acheté, à l'usage prévu.

Les seules mesures réalisées de façon systématique sur le terrain le sont seulement pour les courses de galop, à l'aide d'un pénétromètre. Transmises aux parieurs, elles ne donnent qu'une indication de la « profondeur » du terrain, sans qu'aucune relation n'ait jamais été étudiée entre ce paramètre et les contraintes qui s'exercent effectivement sur l'appareil locomoteur du cheval.

Depuis quelques années, l'utilisation des sols synthétiques (sables fibrés ou fibrés-huilés), encore appelés sols « tout temps », s'est développée dans plusieurs pays, dont la France. Par exemple aux États-Unis, au cours des quatre dernières années, les pistes en « dirt » de nombreux hippodromes, notamment tous ceux de l'État de Californie, ont été remplacées par des pistes en synthétique, praticables toute l'année, même en cas de pluie ou de gel, et jugées empiriquement moins traumatisantes. Les conséquences biomécaniques de ce type de sols sur la locomotion étaient totalement inconnues lorsque le projet Sequisol a débuté en 2006.

Le projet Sequisol s'est ainsi naturellement doublé d'un volet R & D. Celui-ci est mené depuis fin 2007 en partenariat avec deux entreprises : Labosport (Le Mans, Sarthe), spécialisée dans la certification des sols sportifs chez l'Homme, et Normandie drainage (Montchauvet, Calvados), l'un des principaux fabricants de sols équestres en France et premier fabricant français de sols de type sable fibré-huilé.

Nous présenterons d'abord le protocole expérimental que nous avons mis au point pour répondre aux objectifs du projet Sequisol et les principaux résultats obtenus lors des tests préliminaires effectués chez des chevaux trotteurs au centre d'entraînement de Grosbois. Puis, nous exposerons, dans un bilan préliminaire du projet, les résultats comparés obtenus sur dix pistes situées en Basse-Normandie et dans la région parisienne.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Instruments de mesure

Nous avons développé deux techniques de mesure innovantes ; elles permettent de quantifier les forces qui s'exercent sur l'appareil locomoteur chez le cheval en mouvement. Il s'agit d'une part d'un fer dynamométrique 3D qui mesure la force de réaction au sol dans les trois directions de l'espace et d'autre part, d'un procédé ultrasonore de mesure de la force qui s'exerce dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (tendon perforé). Ces instruments sont complétés par d'autres équipements : un accéléromètre 3D fixé sur le pied, des centrales de mesure inertielle placées sur le dos et une caméra haute fréquence.

La mise en place de tous ces instruments **n'est pas invasive** ; ils sont utilisés dans les conditions de **l'exercice sportif intense**, imposées par le projet Sequisol, c'est-à-dire les conditions les plus proches possible de celles de l'entraînement, voire de la compétition.

Fer dynamométrique 3D

La mesure de la force de réaction au sol est généralement effectuée par une plate-forme de forces (Pratt & O'Connor, 1976 ; Merckens *et al.* 1985). De dimension réduite et fixée dans le sol à un endroit donné, la plate-forme de forces ne permet pas d'effectuer des mesures à grande vitesse, sur plusieurs foulées successives, ni sur différents types de sols. Nous avons mis au point un fer dynamométrique 3D, porté par le sujet (ou embarqué), grâce auquel le recueil des forces n'est plus effectué au sol mais directement sous le pied du cheval.

Ce prototype se distingue des modèles précédemment décrits dans la littérature par ses capteurs piézo-électriques au lieu des jauges d'extensométrie (Roland *et al.* 2005), évaluant les forces selon les trois axes de l'espace (capteurs triaxiaux) à la différence des capteurs uniaxiaux (Barrey *et al.* 1990, 1991 ; Kai *et al.* 2000).

Quatre de ces capteurs, un en talon et un en mamelle de chaque côté du pied, sont pris en « sandwich » et pré-contraints entre deux plaques d'alliage d'aluminium usinées à la forme d'un fer (**figure 1A**). Cet ensemble est ensuite fixé à un troisième fer, broché de façon traditionnelle sous le sabot antérieur droit du cheval. Les cotes du prototype ont été calculées par CAO (conception assistée par ordinateur), ce qui a permis d'optimiser le fonctionnement des capteurs, le poids total du fer dynamométrique (490 g), son encombrement (20 mm d'épaisseur), sa résistance mécanique et sa facilité d'utilisation. Ce fer dynamométrique a été validé, d'abord *in vitro*, puis *in vivo* au pas et au petit trot (Chateau *et al.* 2009b).

Outre la mesure globale des efforts à l'interface pied-sol, il fournit également des informations sur la répartition des efforts sur la paroi du sabot et sur la trajectoire du centre des pressions (point où la résultante des forces de réaction au sol est appliquée sous le sabot).

Accéléromètre triaxial

Les accéléromètres sont des instruments de choix pour caractériser le choc du pied sur le sol et les vibrations générées par ce choc. Le modèle utilisé dans le projet Sequisol est un accéléromètre piézoélectrique triaxial miniature (10,2 mm d'arête, 4 grammes). Dans le cadre des expérimentations effectuées à Grosbois, l'accéléromètre utilisé présente une étendue de mesure de 500 g. Il est fixé sur la paroi latérale du sabot AD au moyen d'un système de contention moulé et collé sur la paroi (**figure 1B**). Les signaux analogiques émis sont amplifiés et convertis en signaux numériques, stockés dans un ordinateur durci. Comme pour le fer dynamométrique, l'ensemble de la chaîne d'acquisition est placé sur le sulky (**figure 1**). En plus de l'évaluation des décélérations dans les trois directions de l'espace, une analyse spectrale (transformée de Fourier) du signal accélérométrique est utilisée pour mesurer les vibrations générées par le choc.

Capteur ultrasonore de mesure de la force dans le tendon perforé

Ce procédé, entièrement original (breveté), permet de mesurer la force qui s'exerce dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (tendon perforé, le plus souvent lésé, toutes disciplines sportives confondues), au cours du mouvement. Il est basé sur la relation, démontrée expérimentalement, qui lie la vitesse des ultrasons se propageant dans un tendon et la force à laquelle ce tendon est soumis (Pourcelot *et al.* 2005). Il a déjà été appliqué aux études de l'effet de ferrures correctrices (Crevier-Denoix *et al.* 2004, 2006, 2007b ; Ravary 2005) et de celui des sols (Crevier-Denoix *et al.* 2007a) sur la tension du tendon perforé, au pas et au petit trot.

Le dispositif comprend une sonde composée d'un émetteur ultrasonore et de trois récepteurs (fréquence : 1 MHz, 6,5 cm de long, 40 grammes ; **figure 1C**). Le module électronique de commande, de digitalisation et de stockage des signaux ultrasonores, embarqué sur le sulky (**figure 1**), est muni d'entrées auxiliaires qui permettent la synchronisation des données de la sonde avec les données accélérométriques et celles issues du fer dynamométrique 3D.

Avant de placer la sonde, dont la forme a été préalablement adaptée à la région métacarpienne palmaire du cheval, la peau est tondu, dépilée, puis rincée à l'eau tiède. La sonde, couverte de gel acoustique, est ensuite placée en regard du tendon perforé grâce à une guêtre fenêtrée, maintenue à l'aide d'une bande élastique type Vetrap* (Crevier-Denoix *et al.* 2007b).

La vitesse des ultrasons est mesurée entre les deux récepteurs les plus éloignés en considérant, d'une part, la distance séparant ces deux récepteurs et d'autre part, le délai de réception par chaque récepteur. Cette vitesse (en m/s) est convertie en force (en N) dans le tendon grâce à la force verticale de réaction au sol enregistrée simultanément par le fer dynamométrique, et en utilisant les données issues d'expérimentations *ex vivo* réalisées précédemment par l'Unité (Jerbi *et al.* 2000).

COMMUNICATION

Autres instruments

En complément des trois instruments précédents, un système de **mesure de la mobilité axiale et de la symétrie locomotrice**, composé de quatre centrales de mesure inertielle (X-sens MT9-B), est fixé sur la ligne du dessus (**figure 1D**). Ces dispositifs permettent de calculer les déplacements horizontaux et verticaux au point de fixation des capteurs et de détecter des asymétries discrètes de la locomotion, se traduisant par des défauts d'amplitude des mouvements verticaux de la croupe ou du garrot, lors des posés successifs des diagonaux gauche et droit.

Chaque test est filmé avec une **caméra haute fréquence** (Vision Research Phantom v5.1, Photonlines) à la cadence de 600 images par seconde ; elle est embarquée dans une camionnette se déplaçant à côté du cheval pendant les tests (**figure 1E**). Les images sont synchronisées avec les données issues des

autres appareils de mesure. Elles sont utilisées pour l'analyse du geste sportif et pour l'interprétation des résultats. Des marqueurs cinématiques, disposés au centre de rotation des principales articulations du membre, permettent, grâce à un traitement informatique *a posteriori*, de mesurer les mouvements de flexion et d'extension des articulations au cours de la foulée.

Afin de standardiser la vitesse entre les tests, un **compteur de vitesse digital** a été adapté sur la roue du sulky. À chaque tour de roue, un aimant fixé sur l'un des rayons vient fermer un circuit électronique. La vitesse de rotation (en tours/seconde) est ensuite convertie en vitesse linéaire en la multipliant par le périmètre de la roue. Cette information est retournée au driver au moyen d'un petit afficheur LCD situé dans son champ de vision direct. Grâce à ce système, le driver peut juger de sa vitesse et de sa stabilité en temps réel, et accroître la reproductibilité des mesures en minimisant les écarts de vitesse d'un essai à l'autre.

Protocole expérimental

En pratique, les différents instruments de mesure sont tous mis en place sur le cheval et les modules électroniques correspondants sont embarqués sur le sulky. Des méthodes de synchronisation des différents types d'enregistrements ont été développées, de façon à ce que les mêmes séquences d'une session d'enregistrement soient analysées. Au cours d'une expérimentation donnée, les enregistrements sont effectués chez un même cheval, conduit par le même driver.

Nous avons principalement travaillé en 2007-2008 dans le centre d'entraînement pour trotteurs de Grosbois (Val-de-Marne) où deux des principales pistes d'entraînement (sable concassé et sable fibré-huilé) ont été comparées.

Trois chevaux Trotteurs français (TF) ont été utilisés : deux hongres (16 ans, 560 kg [cheval 1] et 10 ans, 500 kg [cheval 2]), et une femelle (3 ans, 540 kg [cheval 3]). Trois sessions expérimentales ont eu lieu avec le cheval 1, une seule avec les chevaux 2 et 3, à une vitesse imposée et contrôlée de 9,7 m/s, en ligne droite au grand trot. Afin de neutraliser l'influence de la fatigue du cheval sur les résultats, les pistes ont été testées en alternance trois fois, selon un ordre aléatoire.

Pour chaque test, l'enregistrement dure 8 secondes. Dix foulées successives sont extraites de cette séquence d'enregistrement. Les valeurs correspondantes sont ensuite moyennées pour chaque essai, puis pour chaque sol.

À partir des mesures fournies par chaque instrument, différents paramètres biomécaniques ont été déterminés pour chacune des foulées sélectionnées. L'effet du sol sur ces paramètres a été étudié par une analyse de variance (procédure GLM de SAS, SAS Institute Inc., Cary, USA), en tenant compte de l'effet de la vitesse sur les variables. Le seuil de significativité retenu est de 0,05.

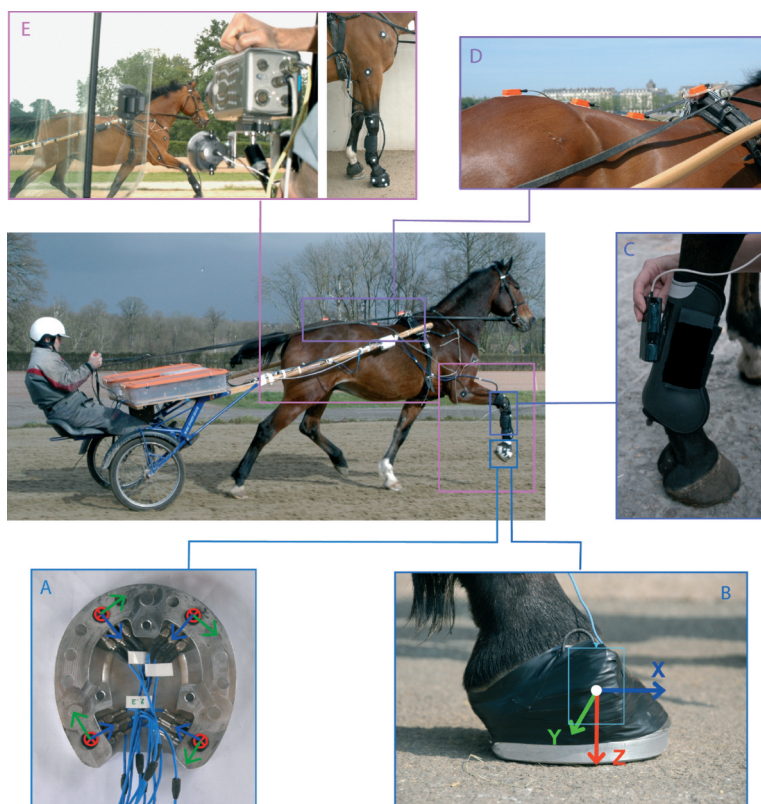


Figure 1 : Instruments de mesure utilisés pour l'évaluation de l'effet des pistes sur la locomotion du cheval trotteur à grande vitesse. Ces instruments, synchronisés entre eux, sont :

- A-** un fer dynamométrique tridimensionnel, muni de 4 capteurs de force triaxiaux, qui mesure la force de réaction au sol dans les 3 directions de l'espace ;
- B-** un accéléromètre triaxial, fixé sur la paroi du sabot, permettant de mesurer les décélérations et les vibrations générées par le choc du sabot à l'impact ;
- C-** un capteur ultrasonore qui permet d'évaluer la force s'exerçant dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt ;
- D-** des centrales de mesure inertielle, permettant d'analyser la mobilité dorsale et la symétrie locomotrice ;
- E-** des marqueurs cinématiques, pour analyser les mouvements articulaires, l'orientation et les glissements du sabot, grâce à une caméra haute fréquence.

RÉSULTATS ET DISCUSSION DE L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

Résultats

Paramètres de la foulée

La vitesse contrôlée sur l'ensemble des tests est respectivement de $9,78 \pm 0,47$ m/s et de $9,78 \pm 0,44$ m/s, sur le sable fibré-huilé et sur le sable concassé. La longueur des foulées est significativement plus faible sur le sable fibré-huilé ($5,15 \pm 0,28$ m) que sur le sable concassé ($5,23 \pm 0,21$ m). Leur fréquence, mesurée indépendamment à partir des enregistrements du fer dynamométrique, est significativement plus élevée sur le premier type de piste que sur le second ($1,90 \pm 0,07$ vs $1,87 \pm 0,06$ foulées/s.). La valeur absolue de la durée de l'appui, de $0,13$ s, n'est pas significativement différente entre les deux types de sols; en revanche, sa durée relative (ratio durée de l'appui sur durée de la foulée) est supérieure sur le sable fibré-huilé ($24,09 \pm 1,00$ % vs $23,77 \pm 0,96$ %).

Fer dynamométrique 3D

Les enregistrements étant réalisés en ligne droite, sur des pistes horizontales, seules les composantes horizontale longitudinale (F_x) et verticale (F_z) de la force de réaction au sol sont décrites ici.

Le tracé de la force longitudinale F_x au cours de la phase d'appui présente deux valeurs maximales. La première, positive, cor-

respond à la force maximale de freinage; elle apparaît entre 15 et 35 % de la phase d'appui et son amplitude varie de 40 à 55 % du poids du cheval. Elle est plus faible sur le sable fibré-huilé (2392 ± 360 N) que sur le sable concassé (2923 ± 281 N) et survient significativement plus tardivement, d'environ 5 % de la durée de la phase d'appui (*figure 2A*). **Le freinage est donc atténué et plus progressif sur le sable fibré-huilé, car retardé.**

La force maximale de freinage apparaît comme le paramètre le plus discriminant vis-à-vis des sols (Robin *et al.* 2009). La seconde valeur maximale de la force longitudinale est négative et correspond à la force de propulsion maximale; son amplitude est moitié moindre par rapport à la précédente.

Les tracés de force verticale (F_z) présentent un seul maximum, positif du fait de l'orientation proximo-distale de l'axe Z. Son amplitude est en moyenne de $1,7 \pm 0,2$ fois le poids du corps pour les trois chevaux (*figure 2B*). Elle est légèrement mais significativement plus faible sur le sable fibré-huilé (9024 ± 1011 N) que sur le sable concassé (9231 ± 938 N). Ce maximum apparaît légèrement retardé, d'environ 2 % de la durée de la phase d'appui, pour le premier type de revêtement par rapport au second.

Les valeurs de F_x et de F_z montrent un pic, au cours de leur augmentation, au début de la phase d'appui. Ce pic d'impact correspond au début de la phase de support lorsque le pied se pose à plat (*figure 2*). L'amplitude des forces d'impact est significativement supérieure sur le sable concassé, à la fois dans leur composantes

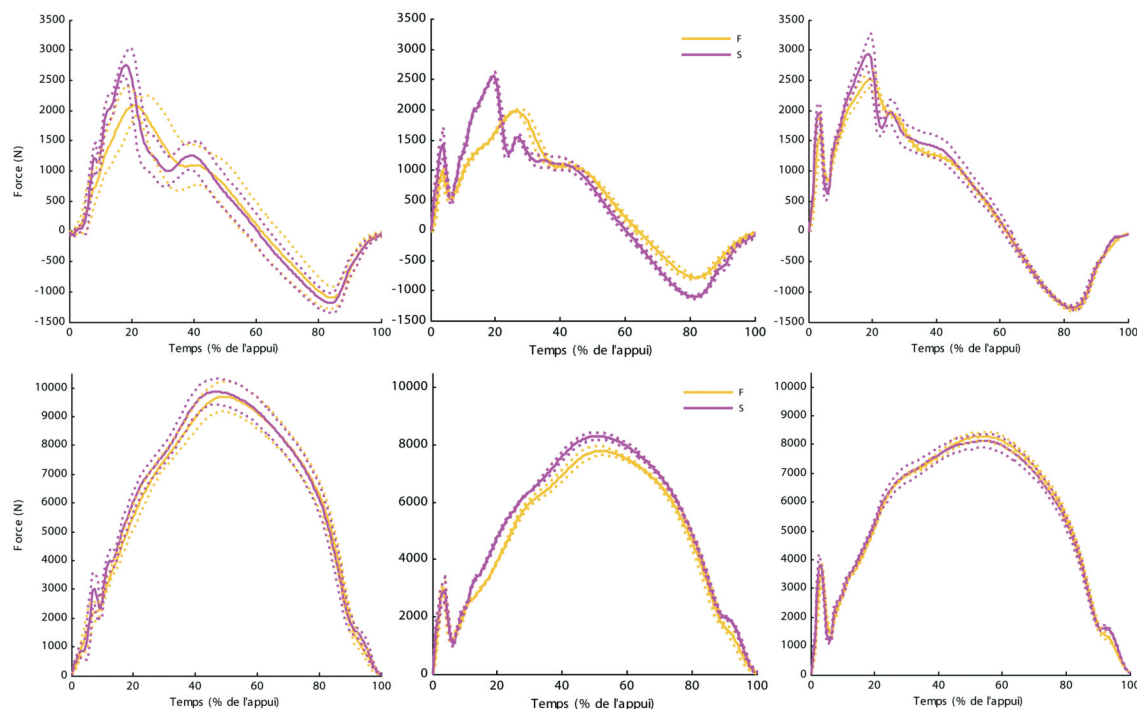


Figure 2: Force de réaction au sol longitudinale (ligne du haut) et verticale (ligne du bas) mesurée grâce au fer dynamométrique 3D chez trois chevaux (1, 2, 3, respectivement à gauche, au centre et à droite), au trot à 9,7 m/s (35 km/h) sur deux pistes (sable fibré-huilé - F, sable concassé - S). Moyennes et écarts-types inter-essais :

- cheval 1 : 9 essais (90 foulées) par sol,
- cheval 2 : 3 essais (30 foulées) par sol,
- cheval 3 : 3 essais (30 foulées) par sol.

COMMUNICATION

horizontale et verticale. Il est produit au même moment sur les deux surfaces, à 5,7 % de la durée de l'appui en moyenne. Mais ce paramètre dépend de la façon dont le pied se pose, donc du cheval : il se produit à environ 3,5 et 3,4 % de la phase d'appui chez les chevaux 2 et 3 qui posent leur pied plutôt à plat ; il apparaît vers 7,1 % de l'appui chez le cheval 1 qui pose son pied nettement en talons et son amplitude est par ailleurs plus faible (figure 2).

Accéléromètre 3D

L'amplitude de la décélération du sabot à l'impact est fortement conditionnée par la nature du sol. Pour les 3 chevaux, la décélération verticale est significativement plus faible sur le sable fibré-huilé par rapport au sable concassé, $1601 \pm 678 \text{ m/s}^2$ vs. 3362 ± 1129 (Chateau *et al.* 2009a) ; le choc de l'impact est ainsi, en moyenne, atténué de plus de 50 % (figure 3).

Les mesures accélérométriques ont montré que le sable fibré-huilé réduit les vibrations générées par le choc et induit une décélération plus progressive du pied au cours de la phase de freinage (Chateau *et al.* 2009a). Parallèlement, l'accélération du pied lors du lever des talons (phase initiale du décollerment du pied) est plus faible (392 ± 35 vs. $459 \pm 37 \text{ m/s}^2$) sur le sable fibré-huilé que sur le sable concassé.

Capteur ultrasonore de mesure de la force dans le tendon perforé

Pour des raisons techniques, le procédé ultrasonore n'a pu être mis en œuvre que sur les chevaux 1 et 3.

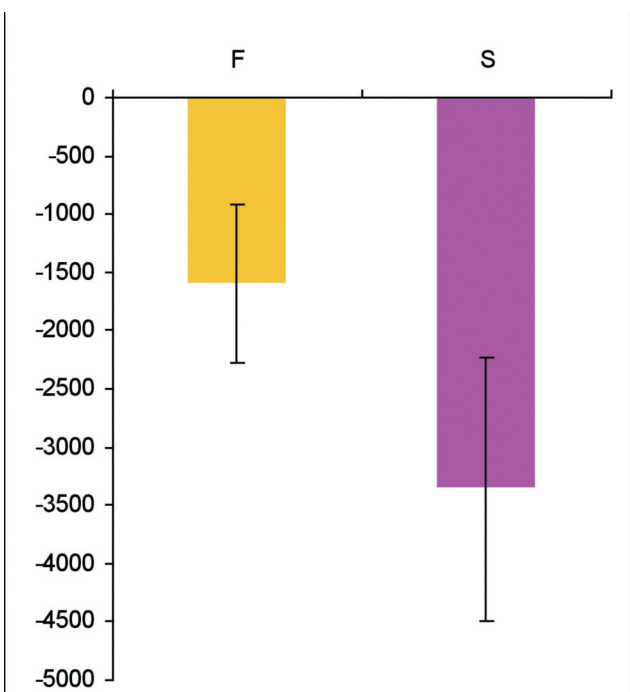


Figure 3 : Décélération verticale (m.s^{-2}) du sabot à l'impact, mesurée sur deux pistes (sable fibré-huilé - F et sable concassé - S) au trot à 9,7 m/s (35 km/h). Moyennes et écarts-types sur 150 foulées enregistrées sur 3 chevaux.
* : différence statistiquement significative ($p < 0,05$).

La force maximale dans le tendon perforé, chez ces deux chevaux, est significativement plus faible sur le sable fibré-huilé ($6542 \pm 1008 \text{ N}$) que sur le sable concassé ($7065 \pm 831 \text{ N}$) (figure 4). Le moment de la phase d'appui auquel elle survient est aussi légèrement, mais significativement, différé sur le sable fibré-huilé (51,7 % vs. $49,5 \pm 7,1$ %). Outre le maximum de force, observé vers le milieu de la phase d'appui, un ou deux pics plus précoces, de plus faible amplitude, se produisent : d'une part vers 30 % de la phase d'appui chez les deux chevaux, d'autre part vers 13 % chez le seul cheval 3 (figure 4). Ces pics sont plus prononcés sur le sable concassé que sur le sable fibré-huilé (Crevier-Denoix *et al.* 2009).

La comparaison avec les données cinématiques a révélé que ces pics précoces sont synchrones d'évènements (plateaux) visibles sur les tracés d'évolution de l'angle du boulet en fonction du temps. Le pic à 30 % de l'appui est en outre synchrone du début

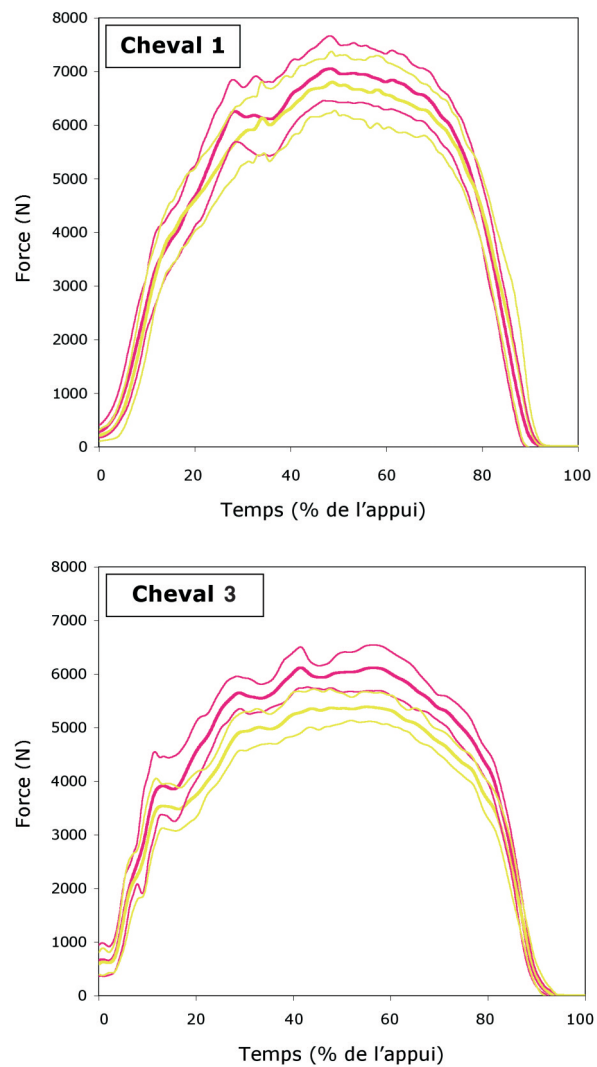


Figure 4 : Comparaison de la force dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (moyenne \pm écart-type, en Newton, N) au cours de la phase d'appui sur la piste en sable fibré-huilé (jaune) et en sable concassé (rose), chez deux chevaux à 9,7 m/s (35 km/h).

de l'extension interphalangienne, qui fait suite à la flexion interphalangienne maximale (Crevier-Denoix *et al.* 2009).

Au-delà d'une force correspondant à 90 % du poids du corps (soit 4944 N pour le cheval 1 et 4768 N pour le cheval 3), la vitesse maximale de mise en charge du tendon, appréciée par la pente de la courbe de la force en fonction du temps, est significativement plus faible sur le sable fibré-huilé ($274 \pm 179 \text{ kN.s}^{-1}$) que sur le sable concassé ($371 \pm 192 \text{ kN.s}^{-1}$). Elle se produit en outre significativement plus tard, à $36 \pm 15 \%$ de la durée de l'appui contre $28 \pm 11 \%$.

DISCUSSION

Le protocole mis au point est original et innovant: nos instruments embarqués permettent, chez le cheval à grande vitesse, la mesure de nombreux paramètres, de façon synchronisée. L'effet des sols sur l'appareil locomoteur du cheval est évalué pour la première fois, en prenant en compte non seulement le choc du pied au sol lors de l'impact, mais aussi d'autres aspects, comme la force de freinage et la force dans le tendon perforé, jamais évaluées jusqu'ici dans les conditions sportives.

La comparaison des résultats obtenus sur deux pistes du centre d'entraînement pour trotteurs de Grosbois révèle, également pour la première fois, des différences dans les effets biomécaniques d'une piste en sable fibré-huilé par rapport à ceux d'une piste traditionnelle de sable concassé. Ces différences devront être confirmées mais la capacité de nos instruments de mesure à discriminer les effets de ces deux pistes, toutes deux considérées comme de très bonnes pistes, atteste d'ores et déjà de leur sensibilité et de leur adéquation aux objectifs du programme.

Le sable fibré-huilé, testé à Grosbois, s'avère significativement plus amortissant, donc probablement moins traumatisant pour les articulations, en raison d'un choc moindre à l'impact et d'un freinage de moindre intensité, plus graduel. Il s'en suit des mouvements articulaires digitaux mieux contrôlés, assurant une mise en tension plus progressive et une tension maximale moindre du tendon perforé au cours de l'appui. Ces résultats sont à mettre en relation avec la plus grande capacité du sable fibré-huilé à se déformer, qui permet l'enfoncement des talons lors du contact entre le pied et le sol. Ce sol amortit ainsi le choc de l'impact en limitant les brutales variations d'angles articulaires observées sur sol dur au cours de la première partie de l'appui, en particulier l'extension du boulet consécutive à la forte et rapide flexion interphalangienne distale (Denoix 1985, 1994; Chateau *et al.* 2004, 2005, 2006; Crevier-Denoix *et al.* 2001, 2007b; Setterbo *et al.* 2008).

Toutefois, le **confort** locomoteur de l'animal sur la piste de sable fibré-huilé – tel qu'il peut être évalué à travers la longueur de la foulée, sa fréquence et la symétrie locomotrice, qui sont aussi potentiellement des critères de **performance** – **n'apparaît pas significativement supérieur** à celui sur la piste de sable concassé.

À l'issue de cette étude préliminaire, et en tenant compte des données de la littérature (Radin *et al.* 1973, Serink *et al.* 1977; Thomason & Peterson 2008), **plusieurs critères (relatifs) de risque accidentogène et de confort** locomoteur peuvent être proposés.

Le risque de lésion articulaire ou tendineuse **est moindre** lorsqu'à vitesse donnée, **sont plus faibles** :

- le pic de décélération du pied (et le pic de force correspondant) au moment de l'impact,
- les vibrations générées par le choc de l'impact,
- la force verticale maximale au cours de l'appui et la vitesse de mise en charge maximale du membre,
- la force maximale de freinage (force horizontale longitudinale),
- la force maximale et la vitesse de mise en charge du tendon perforé.

Le confort locomoteur du cheval est accru :

- lorsqu'à une vitesse donnée (surtout à vitesse moyenne), la longueur de la foulée et le rebond (amplitude verticale des mouvements du garrot et de la croupe) sont plus élevés et que la fréquence de la foulée est plus faible;
- et qu'à grande vitesse, la régularité de l'allure (symétrie locomotrice) est conservée.

COMPARAISON DES EFFETS SUR DIX PISTES : PREMIER BILAN DU PROGRAMME SEQUISOL

Depuis octobre 2006, dix pistes différentes ont été testées dans cinq sites de Basse-Normandie et de la région parisienne. Nous avons, pour un premier bilan, comparé les résultats obtenus sur ces pistes, à partir des paramètres: force maximale de freinage et décélération verticale maximale à l'impact, mesurés chez le même cheval, le cheval 1 de l'étude préliminaire.

La **figure 5** présente les valeurs de la force maximale de freinage et du moment de sa survenue au cours de l'appui, obtenues lors d'enregistrements réalisés sur chacune de ces 10 pistes. Elle illustre et confirme le caractère amortissant des pistes en fibré-huilé, avec une force maximale moindre, que ce soit au Haras de Ginai (Orne) ou à Grosbois, les deux pistes provenant du même fabricant, Normandie drainage. Le retard observé dans la survenue du maximum de cette force sur les pistes en fibré-huilé corrobore les observations cinématiques du membre, décrites récemment sur ce type de sols (Setterbo *et al.* 2008). Le freinage, au cours duquel le pied glisse tout en pénétrant plus ou moins dans le sol, est plus progressif sur les pistes en fibré-huilé mais il entraîne de fait un certain retard dans le décours de la phase d'appui.

Le terrain en herbe de l'hippodrome de Cabourg présente aussi des propriétés d'amortissement: la force maximale de freinage est relativement faible, mais sans retard dans sa survenue,

COMMUNICATION

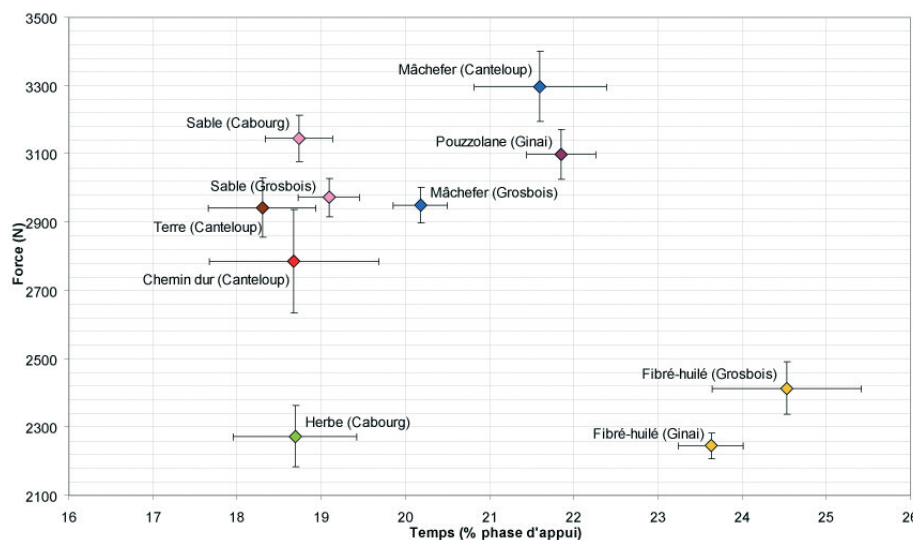


Figure 5 : Comparaison des forces maximales de freinage et de leur instant de survenue au cours de la phase d'appui, lors de tests effectués sur différentes pistes, avec le même cheval (cheval 1) à 9,7 m/s (35 km/h).

Valeurs moyennes sur plusieurs foulées (n) et intervalle de confiance :

- Fibré-huilé du Haras de Ginai : n = 60
- Fibré-huilé, mâchefer et sable du centre d'entraînement de Grosbois : n = 90
- Pouzzolane du Haras de Ginai : n = 30
- Herbe de l'hippodrome de Cabourg : n = 30
- Sable de l'hippodrome de Cabourg : n = 60
- Mâchefer, chemin dur et piste en terre du Haras de Canteloup : n = 30

ce qui – là encore – est conforme aux observations cinématiques (Setterbo *et al.* 2008).

La force maximale de freinage relativement faible et précoce mesurée sur le chemin dur du Haras de Canteloup (Calvados) est probablement due à un faible enfoncement du pied glissant en surface, sur un terrain, par ailleurs, très peu amortissant (**figure 6**).

En ce qui concerne les décélérations maximales du pied lors de l'impact (**figure 6**), des terrains tels que le fibré-huilé ou l'herbe (sous réserve que la teneur en eau du sol soit suffisante) apparaissent plus amortissants, alors que les pistes en sable

concassé sont généralement plus dures. Les pistes en mâchefer se situent entre les deux types précédents. Comme attendu, un chemin dur, non travaillé (ici le chemin d'accès aux pistes fortement damé, Haras de Canteloup), provoque les chocs les plus violents lors de l'impact au sol. La piste en pouzzolane du Haras de Ginai, bien travaillée avant les essais, s'est révélée au contraire très souple.

L'amplitude du choc lors de l'impact est conditionnée par le niveau d'entretien de la piste. Une étude comparative menée le même jour, avec le même cheval, sur une piste en mâchefer au centre

Décélération verticale à l'impact ($m.s^{-2}$)

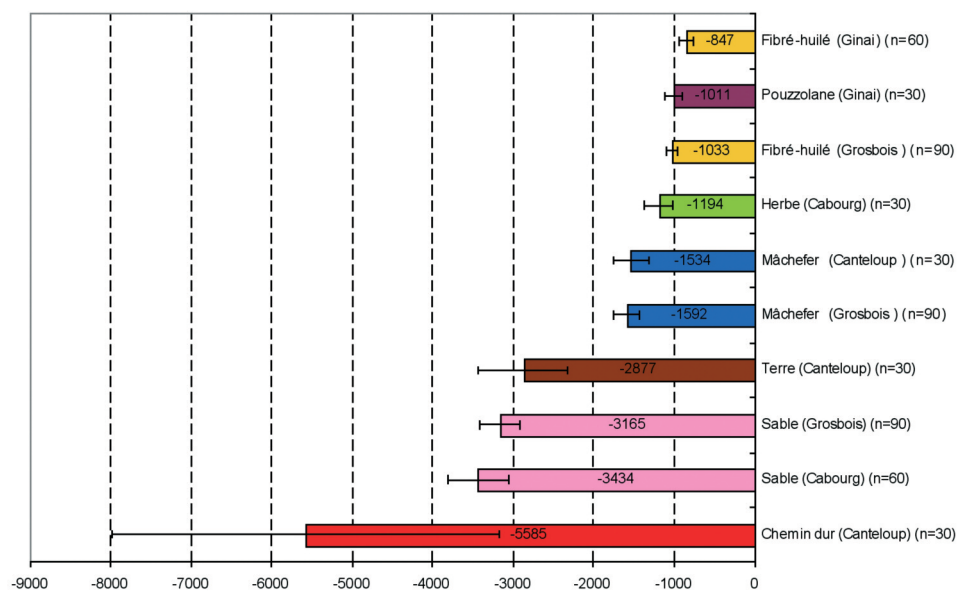


Figure 6 : Comparaison des décélérations verticales ($m.s^{-2}$) lors du poser du sabot (choc à l'impact), mesurées chez le même cheval (cheval 1) se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur différentes pistes. Valeurs moyennes sur plusieurs foulées (n) et intervalle de confiance.

Notez l'augmentation croissante du choc en allant des pistes de type fibré-huilé et herbe vers le mâchefer, puis la terre, le sable concassé et enfin, un chemin dur non préparé. La piste en pouzzolane, très travaillée, se distingue des pistes en sable concassé.

de Grosbois, dont trois portions avaient été préparées de façon différente, montre une diminution de l'amplitude du choc d'un facteur supérieur à 2 entre la portion hersée et arrosée et la portion fermée et laissée sans entretien pendant quelques jours (*figure 7*).

L'évaluation de la fermeté d'une piste doit donc nécessairement tenir compte de son état d'entretien au moment de la mesure.

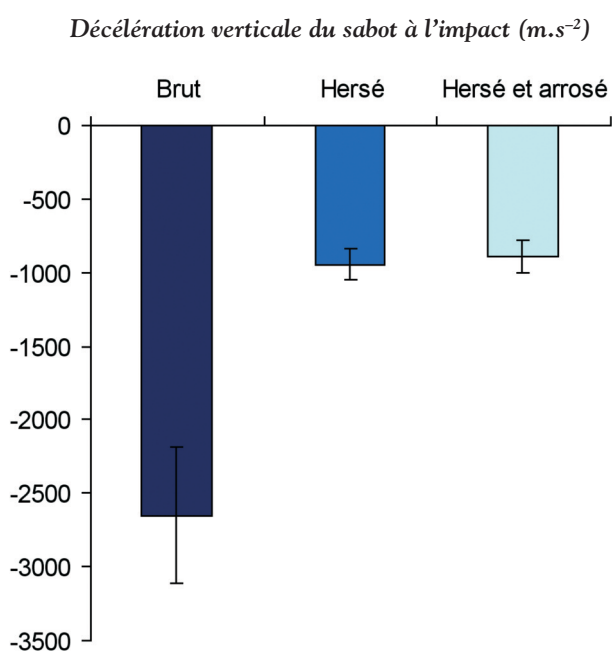


Figure 7 : Comparaison des décélérations verticales (m.s⁻²) lors du poser du sabot (choc à l'impact) mesurées chez le même cheval (cheval 1) se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur une piste en mâchefer dont trois portions ont été préparées de façon différente : état « brut » (portion fermée et laissée sans entretien quelques jours), hersé, hersé et arrosé. Valeurs moyennes sur 30 foulées et intervalle de confiance. On peut noter la forte diminution de l'amplitude du choc à l'impact lorsque la piste est travaillée.

CONCLUSION - PERSPECTIVES

Le programme Sequisol n'en est qu'à mi-parcours. Les résultats présentés dans cet article doivent donc être considérés comme préliminaires.

Néanmoins, ils montrent grâce à nos techniques et méthodes, que les contraintes biomécaniques (forces, accélérations) appliquées sur les membres du cheval, dans les conditions de l'entraînement, sont nettement différentes selon la nature des sols. Ainsi, nous pensons pouvoir obtenir - au terme du projet Sequisol - de réels progrès dans la prévention des traumatismes, par un meilleur contrôle de la nature des sols équestres (types de sols employés) et de leur qualité (notamment par des mesures d'entretien adéquates). Par ailleurs, l'adaptation du protocole et des instruments, mis au point chez le trotteur attelé, au cheval monté est en cours, dans le but de pouvoir évaluer, avant la fin de l'année 2009, des pistes de galop et de saut d'obstacles.

Dans la phase d'application et de développement (volet R & D) du projet, nous couplons, dans des expérimentations communes avec notre partenaire industriel, la société Labosport, nos mesures biomécaniques à des mesures relatives aux propriétés dynamiques et aux caractéristiques physiques des sols. L'analyse des corrélations entre ces deux types de mesures est en cours, afin d'aboutir à un appareil de type impactomètre dont les mesures pourront être interprétées en termes de sécurité et de confort pour le cheval.

Mais au-delà de l'étude de l'effet des sols, notre méthodologie et notre savoir-faire doit nous permettre d'explorer la physiologie locomotrice du cheval dans les conditions de l'exercice sportif intense, domaine dans lequel les données scientifiques sont à ce jour encore très parcellaires. A plus long terme, ils pourront être adaptés pour répondre à d'autres questions soulevées comme les effets des ferrures, de certains types d'entraînement, de techniques de réadaptation fonctionnelle, ...

REMERCIEMENTS

- Le Conseil Régional de Basse-Normandie, les Haras Nationaux, le Fonds unique interministériel et le Ministère de l'Agriculture, pour le soutien financier qu'ils apportent au projet Sequisol, labellisé en 2006 par le Pôle de compétitivité « Filière Equine » (région Basse-Normandie). - Les sociétés Labosport et Normandie drainage, partenaires du projet Sequisol.

- M. Blondeau, Département Ingénierie des Haras Nationaux et M. de Lagarde, France Galop, pour leurs conseils et leur soutien depuis l'origine du projet.

- M. Walazyc, SECF, Régisseur du centre d'Entraînement pour trotteurs de Grosbois.

- M. Ribot, SECF, Directeur des hippodromes de Caen et de Cabourg.

- M. Deshaies, France Galop, Directeur de l'hippodrome de Deauville (La Touques).

- MM. J.-P. Viel, B. Desmontils, F. Souloy, entraîneurs de Trot.

- MM. les Maréchaux-ferrants de la Garde Républicaine de Paris.

- La DGER (Ministère de l'Agriculture) et l'INRA, tutelles de l'UMR 957 BPLC.

- M. Guy Launay, secrétaire de l'UMR 957 BPLC.

BIBLIOGRAPHIE

- Bailey, C. J., Reid, S. W. J., Hodgson, D. R., Bourke, J. M., Rose, R. J. 1998. Flat, hurdle and steeple racing: risk factors for musculoskeletal injury. *Equine Vet J.* 30: 498–503.
- Barrey, E. 1990. Investigation of the vertical hoof force distribution in the equine forelimb with an instrumented horseboot. *Equine Vet J. Suppl.* 9, *Exercise Physiology*: 35–38.
- Barrey, E., Landjerit, B., Wolter, R. 1991. Shock and vibration during the hoof impact on different track surfaces. In *Proceedings of Equine Exercise Physiology 3*, (Ed. S. G. B. Persson, A. Lindholm, L. B. Jeffcott). pp.97–106. Davis, CA ICEEP publications.
- Burn, J.F. & Usmar, S.J. 2005. Hoof landing velocity is related to track surface properties in trotting horses. *Equine Vet J.* 2: 37–41.
- Chateau, H., Degueurce, C., Denoix, J.-M. 2004. Effects of a 6° elevation of the heels on the three-dimensional kinematics of the distal portion of the forelimb in the walking horse. *Equine Vet J.* 36: 649–654.
- Chateau, H., Degueurce, C., Denoix, J.-M. 2005. Influence de la nature du sol et de la ferrure sur la biomécanique des articulations digitales. In *Compte-rendu de la 31^e Journée de la Recherche Équine*, pp.35–44, les Haras nationaux, Paris.
- Chateau, H., Degueurce, C., Denoix, J.-M. 2006. Three-dimensional kinematics of the distal forelimb in horses trotting on a treadmill and effects of elevation of heel and toe. *Equine Vet J.* 38: 164–169.
- Chateau, H., Robin, D., Falala, S., Pourcelot, P., Valette, J.-P., Ravary, B., Denoix, J.-M., Crevier-Denoix, N. 2009a. 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: 247–251.
- Chateau, H., Robin, D., Simonelli, T., Pacquet, L., Pourcelot, P., Falala, S., Denoix, J.-M. and Crevier-Denoix, N. 2009b. Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of 3D Ground Reaction Force on a moving horse. *J Biomech.* 42: 336–340.
- Cheney, J.-A., Shen, C. K., Wheat, J.-D. 1973. Relationship of racetrack surface to lameness in the thoroughbred racehorse. *Am J Vet Res.* 34: 1285–1289.
- Clanton, C., Kobluk, C., Robinson, A., Gordon, B. 1991. Monitoring surface conditions of a thoroughbred racetrack. *JAVMA* 198: 613–620.
- Crevier-Denoix, N., Roosen, C., Dardillat, C., Pourcelot, P., Jerbi, H., Sanaa, M., Denoix, J.-M. 2001. Effects of heel and toe elevation upon the digital joints angles in the standing horse. *Equine Vet J Suppl.* 33: 74–78.
- Crevier-Denoix, N., Ravary, B., Defontaine, M., Lematre, M., Denoix, J.-M., Pourcelot, P. 2004. Mise au point et applications d'un procédé non-invasif de mesure des charges supportées par le tendon fléchisseur superficiel du doigt, chez le cheval en mouvement: intérêt pour l'évaluation de ferrures correctrices et de sols. In *Compte-rendu de la 30^e Journée de la Recherche Équine*, pp 1–12, les Haras nationaux, Paris.
- Crevier-Denoix, N., Pourcelot, P., Ravary, B., Falala, S., Chateau, H., Denoix, J.-M. 2006. Prévention et gestion des tendinopathies. *Equ'Idée* 57: 84–87.
- Crevier-Denoix, N., Pourcelot, P., Ravary, B., Falala, S., Chateau, H., Denoix, J.-M. 2007a. Effets de la nature du sol sur la tension du tendon fléchisseur superficiel du doigt du cheval, à petite et à grande vitesse. In *Compte-rendu de la 33^e Journée de la Recherche Équine*, pp. 25–33, les Haras nationaux, Paris.
- Crevier-Denoix, N., Ravary, B., Denoix, J.-M., Pourcelot, P. 2007b. Acoustodynamometry: An innovating non-invasive technique used to measure tendon load during movement. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France* 160, 25–31.
- Crevier-Denoix, N., Pourcelot, P., Ravary, B., Robin, D., Falala, S., Uzel, S., Grison, A.-C. Valette, J.-P., Denoix, J.-M., 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.
- Denoix, J.-M. 1985. Etude biomécanique de la région phalangienne chez le cheval. In *Compte-rendu de la 11^e Journée d'Etude du CEREOPA*, pp. 60–75, les Haras nationaux, Paris.
- Denoix, J.-M. 1994. Functional anatomy of tendons and ligaments in the distal limbs (manus and pes). *Vet Clin North Amer-Equine Pract.* 10: 273–322.
- Gustas, P., Johnston, C., Drevemo, S. 2006. Ground reaction force and hoof deceleration patterns on two different surfaces at the trot. *Equine and Comparative Exercise Physiology* 3: 209–216.
- Henley, W.E., Rogers, K., Harkins, L., Wood, J. L. N. 2006. A comparison of survival models for assessing risk of racehorse fatality. *Prev Vet Med.* 74: 3–20.
- Jerbi, H., Pourcelot, P., Dardillat, C., Ribot, X., Bortolussi, C., Denoix, J.-M., Crevier-Denoix, N. 2000. Equine superficial digital flexor tendon loads and strains: Comparative analysis on isolated limbs and tendons. *Arch Physiol Biochem.* 108: 176.
- Kai, M., Takahashi, T., Aoki, O., Oki, H. 1999. Influence of rough track surfaces on components of vertical forces in cantering thoroughbred horses. *Equine Vet J Suppl.* 30: 214–217.
- Kai, M., Aoki, O., Hiraga, A., Oki, H., Tokuriki, M. 2000. Use of an instrument sandwiched between the hoof and shoe to measure vertical ground reaction forces and three-dimensional acceleration at the walk, trot and canter in horses. *Am J Vet Res.* 61: 979–985.
- Kobluk, C. N. 1998. Epidemiologic studies of racehorse injuries. In *Current Techniques in Equine Surgery and Lameness*, 2nd edition, (Ed. N. A. White & J. M. Moore), pp 654–569. WB Saunders Company.
- Merkens, H. W., Schamhardt, H. C., Hartman, W. R., Kersjes, A. W. 1985. Ground reaction fore patterns of Dutch Warmblood horses at normal walk. *Equine Vet J.* 18: 207–214.
- Mohammed, H. O., Hill, T., Lowe, J. 1991. Risk factors associated with injuries in Thoroughbred horses. *Equine Vet J.* 23: 445–448.
- Parkin, T. D. H., Clegg, P. D., French, N. P., Proudman, C. J., Riggs, C. M., Singer, E. R., Webbon, P. M., Morgan, K. L. 2004. Risk factors for fatal lateral condylar fracture of the third metacarpus/metatarsus in UK racing. *Equine Vet J.* 37: 192–199.
- Pinchbeck, G. L., Clegg, P. D., Proudman, C. J., Morgan, K. L., French, N. P. 2004. A prospective cohort study to investigate risk factors for horse falls in UK hurdle and steeplechase racing. *Equine Vet J.* 36: 595–601.
- Pourcelot, P., Defontaine, M., Ravary, B., Lematre, M., Crevier-Denoix, N. 2005. A non-invasive method for tendon force measurement. *J Biomech.* 38: 2124–2129.
- Pratt, G. W. & O'Connor, T. 1976. Force plate studies of equine biomechanics. *Am J Vet Res.* 37: 1251–1255.
- Radin, E. L., Parker, H. G., Pugh, J. W., Steinberg, R. S., Paul, I. L., Rose, R. M. 1973. Response of joints to impact loading - III relationship between trabecular microfractures and cartilage degeneration. *J Biomech.* 6: 51–57.
- Ratzlaff, M. H., Hyde, M. L., Hutton, D. V., Rathgeber, R. A., Balch, O. K. 1997. Interrelationships between moisture content of the track, dynamic properties of the track and the locomotor forces exerted by galloping horses. *J Equine Vet Sci.* 17: 35–42.
- Ratzlaff, M. H., Wilson, P. D., Hutton, D. V., Slinker, B. K. 2005. Relationships between hoof-acceleration patterns of galloping horses

and dynamic properties of the track. *Am J Vet Res.* 66: 589-595.

- Ravary, B. 2005. Développement d'un procédé non-invasif de mesure des efforts qui s'exercent sur les tendons. Application à l'évaluation de l'effet de ferrures correctrices sur le tendon fléchisseur superficiel du doigt du cheval. Thèse de Doctorat d'Université, Paris VI, 199 pages.
- Ravary B., Pourcelot P., Bortolussi C., Konieczka N., Crevier-Denoix N., 2004. Strain and force transducers used in human and veterinary tendon and ligament biomechanics studies. *Clinical Biomechanics* 19: 433-447.
- Robin, D., Chateau, H., Pacquet, L., Falala, S., Valette, J.-P., Pourcelot, P., Ravary, B., Denoix J.-M., 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: 253-256.

- Roland, E.S., Hull, M.L., Stover, S.M. 2005. Design and demonstration of a dynamometric horseshoe for measuring ground reaction loads of horses during racing conditions. *J Biomech.* 38: 2102-2112.
- Serink, M.T., Nachemson, A., Hansson, G. 1977. The effect of impact loading on rabbit knee joints. *Acta orthop Scand.* 48: 250-262.
- Setterbo, J., Garcia, T., Campbell, I., Kim, S., Hubbard, M., Stover, S. 2008. Forelimb kinematics of galloping thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track

surfaces (P235). *Engineering of Sport* 7: 437-446.

- Thomason, J. J., & Peterson, M. L. 2008. Biomechanical and mechanical investigations of the hoof-track interface in racing horses. *Vet Clin North Am-Equine Pract.* 24: 53-77.
- Williams R. B., Harkins L. S., Hamond C. J., Wood J. L. N. 2001. Racehorse injuries, clinical problems and fatalities recorded on British racecourses from flat racing and National Hunt racing during 1996, 1997 and 1998. *Equine Vet J.* 33: 478-486.
- Wilson, J. H. & Robinson, R. A. 1996. Risk factors for equine racing injuries. *Compend Contin Educ Pract Vet.* 18: 682-690.