




**Projet de thèse 2008-2011**

**UMR INRA-ENVA 957  
de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval (BPLC)**

Titre de la thèse :	<b>Analyse des sollicitations dynamiques exercées sur la partie distale du membre antérieur chez le cheval de saut d'obstacles</b>
Directeurs de thèse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pr Nathalie CREVIER-DENOIX</li><li>• Dr Henry CHATEAU (MC)</li></ul>
Autres encadrants	<ul style="list-style-type: none"><li>• Damien ROBIN (Ingénieur ENSAM, Master Bioméca. ENSAM)</li><li>• Sebastien UZEL (Ingénieur Centrale Paris, Master Bioméca. ENSAM)</li></ul>
Financement prévu	Montant : 1530 euros brut / mois Bourse cofinancée par : - le Conseil Régional de Basse Normandie - les Haras Nationaux 
Contacts pour ce projet	Nathalie CREVIER-DENOIX / Henry CHATEAU
Adresse électronique	ncrevier@vet-alfort.fr / hchateau@vet-alfort.fr
Téléphone	01 43 96 71 06 / 01 43 96 72 86
Site web du laboratoire	<a href="http://www.vet-alfort.fr/biomeca/">http://www.vet-alfort.fr/biomeca/</a>

## Résumé

Dans la discipline « saut d'obstacles », l'appareil locomoteur du cheval est soumis à de fortes contraintes, souvent asymétriques. La compréhension des sollicitations dynamiques (forces, accélérations) qui s'exercent sur la partie distale (basse) des membres, en particulier antérieurs, est indispensable pour comprendre la genèse des lésions ostéo-articulaires et tendineuses rencontrées dans cette discipline, et ainsi prévenir ces lésions ou au moins gérer rationnellement les chevaux atteints. Or, la mesure de ces contraintes dans les conditions sportives constitue un défi technologique. Celui-ci se double d'un enjeu socio-économique : les professionnels de la filière équine sont en attente d'informations objectives pour choisir, voire mettre au point, des sols équestres plus sûrs et moins traumatisants.

Ainsi, la question de recherche qui sous-tend ce projet est : quelles sont les sollicitations dynamiques (forces, accélérations) exercées sur la partie distale du membre antérieur chez le cheval de saut d'obstacles ?

Pour répondre à cette question, les objectifs de cette thèse sont :

1. d'adapter à la discipline saut d'obstacles un appareil de mesure original (fer dynamométrique 3D) permettant de quantifier les 3 composantes de la force de réaction au sol;
2. d'appliquer ce dispositif, complété par des accéléromètres triaxiaux, à l'analyse des sollicitations biomécaniques appliquées sur l'extrémité distale du membre antérieur chez les chevaux de cette discipline ;
3. d'interpréter conjointement les informations fournies par les deux types d'instruments de mesure et de comparer les résultats obtenus sur différents types de sol afin d'analyser l'influence de la qualité du sol sur les paramètres biomécaniques étudiés.

# Description du projet de thèse

---

## Contexte, intérêt du sujet, verrous scientifiques...

Parmi les disciplines sportives dans lesquelles le cheval est utilisé comme un athlète de haut niveau, le concours de saut d'obstacles (CSO) se caractérise par des sollicitations intenses de l'appareil locomoteur, très spécifiques des gestes imposés. Les phases d'appel et surtout de réception des sauts ainsi que les virages serrés, imposés par le tracé des parcours, sont considérés comme très contraignants pour les formations ostéo-articulaires et tendineuses de l'extrémité distale des membres antérieurs. En corollaire, certaines lésions de l'appareil locomoteur (entorse, ostéo-arthrose interphalangienne, tendinite de l'appareil fléchisseur profond, etc...) sont plus fréquemment observées chez les chevaux de cette discipline, et constituent chez eux une cause fréquente d'interruption de carrière. Dans ce contexte, un meilleur discernement des circonstances de la locomotion qui produisent ces lésions, et des phénomènes biomécaniques qui les régissent, est un gage d'avancée en termes de compréhension scientifique et un préalable indispensable pour une prévention efficace.

A ce jour, les études biomécaniques qui ont abordé ce sujet se sont principalement limitées à une analyse globale du geste sportif par une approche cinématique (Cassiat et al. 2004, Santamaria et al. 2004). Les rares études qui se sont plus spécifiquement intéressées à l'extrémité distale du membre antérieur (Meershoek et al. 2001) ont utilisé des plateformes de forces scellées au sol, ce qui limite considérablement les conditions d'étude qui sont, de fait, très éloignées de celles de l'entraînement ou la compétition.

La rareté des études précédentes s'explique par la complexité des techniques à mettre en œuvre. Ce projet constitue en effet un défi technologique et méthodologique qui se double d'un enjeu scientifique, par les nouvelles connaissances - inaccessibles jusqu'ici - qu'une telle étude est susceptible d'apporter.

A cela, s'ajoute un fort enjeu socio-économique. Les accidents qui se produisent lors des épreuves sportives sont très souvent attribués à un sol inadapté. Ces accidents ternissent l'image des sports équestres aux yeux du grand public (ex. : épreuve de saut d'obstacles lors des Jeux Olympiques d'Athènes en 2004, au cours de laquelle la mauvaise qualité du sol a été incriminée dans 3 accidents graves). La mise en place d'une méthodologie adaptée à l'analyse des sollicitations biomécaniques dans cette discipline sportive est un préalable indispensable pour pouvoir analyser les conséquences des caractéristiques des pistes ou de la nature des sols sur l'appareil locomoteur du cheval de saut d'obstacles.

---

## Description du sujet

La question de recherche qui sous-tend ce projet est : quelles sont les sollicitations biomécaniques qui exercées sur la partie distale du membre antérieur chez le cheval de saut d'obstacles ?

Pour répondre à cette question, l'objectif de la thèse est dans un premier temps de **mettre au point des outils de mesure adaptés** aux spécificités de l'appareil locomoteur du cheval et de la discipline étudiée. Il s'agit en particulier d'un **fer dynamométrique 3D** (« fer de forces »), équivalent à une plate-forme de forces embarquée sous le pied du cheval, capable de mesurer les forces dans les trois directions, à l'interface entre le sabot et le sol. Cet instrument sera complété par des accéléromètres triaxiaux.

Des versions antérieures de ces outils ont déjà été développées et utilisées chez le trotteur de course, mais l'application de ces techniques sur le cheval de CSO impose une refonte complète de la chaîne de mesure, et implique notamment :

- (1) de redessiner sous CAO un nouveau prototype de fer dynamométrique, mieux dimensionné pour répondre aux sollicitations de la discipline saut d'obstacles, et de vérifier par modélisation (éléments finis) l'adéquation de ce nouveau dispositif aux besoins de l'étude ;
- (2) de repenser la chaîne d'acquisition pour réduire son encombrement et son poids.

En parallèle, d'autres appareils développés ou acquis par l'UMR BPLC permettront de compléter cette approche (procédé ultrasonore de mesure des forces qui s'exercent dans les tendons, centrales de mesure inertielle, caméra haute fréquence,...). L'originalité de tous ces outils est qu'ils sont utilisables dans les **conditions de l'exercice sportif intensif**, qui sont celles à étudier dans le cadre de cette thèse.

Dans un deuxième temps, le procédé sera **testé en conditions réelles** et appliqué à l'analyse des sollicitations dynamiques du membre antérieur chez le cheval de **saut d'obstacles** au cours de tests adaptés aux spécificités de la discipline (réception d'un obstacle, virage serré,...). Les résultats obtenus grâce au fer dynamométrique et aux accéléromètres seront analysés conjointement. Ils seront par ailleurs interprétés sous l'angle biomécanique à la lumière de ceux fournis par les autres instruments de mesure mis en œuvre.

Enfin, ces mesures seront répétées **sur différents types de sols** afin de mieux comprendre les répercussions de la nature du sol sur les paramètres biomécaniques étudiés.

Outre l'innovation technologique et l'apport de nouvelles connaissances scientifiques dans la discipline sportive considérée, ce projet ouvre des perspectives d'applications pratiques concrètes en termes d'amélioration de la qualité des sols équestres. A ce titre, ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre plus large d'un programme de R&D intitulé « Sequisol », labellisé par le Pôle de compétitivité Filière équine (Région Basse-Normandie), et mené en partenariat avec les entreprises Labosport (spécialiste de la certification des sols sportifs chez l'Homme) et Normandie Drainage (fabricant de sols équestres). Ce projet a été sélectionné en 2007 par le Fonds interministériel de compétitivité des entreprises.

---

### **Exemple de compétences qui seront acquises par le doctorant, grâce à la partie scientifique de la formation doctorale constituée par son travail de thèse.**

En plus des compétences scientifiques dans la spécialité, éthiques, déontologiques, en communication scientifique écrite et orale, le doctorant acquerra :

- Maîtrise des moyens expérimentaux (de l'acquisition à l'analyse) dans le domaine de la biomécanique et plus particulièrement de la cinétique (mesure des forces de réaction au sol, accélérométrie).
- Maîtrise du traitement du signal et de l'analyse des données (programmation Matlab).
- Participation au développement de méthodes de mesure originales et innovantes.

Le profil recherché étant celui d'un ingénieur (formation en mécanique générale ou en biomécanique), le(la) doctorant(e) sera guidé(e) pour ce qui a trait aux spécificités de la biomécanique équine, et de la discipline sportive étudiée (CSO), par les responsables scientifiques.

---

### **Références du Laboratoire et du directeur de thèse dans le contexte du projet de thèse**

#### **Références du Laboratoire**

L'Unité de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval, créée en 1991, a été labellisée en tant qu'UMR (Unité Mixte de Recherche) entre l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA) en 1999. Elle compte aujourd'hui 19 membres, dont 10 permanents, répartis sur 2 sites : l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (94), et le CIRALE (Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines), situé à Dozulé (14). Le CIRALE est un centre de référence international en matière de diagnostic, d'enseignement et de recherche sur les troubles locomoteurs du cheval.

Tous les travaux de l'UMR BPLC portent sur l'appareil locomoteur du cheval, dont les affections représentent la cause N°1 de pertes économiques, tant dans le domaine de l'élevage que dans celui de l'exploitation des chevaux (courses et sport), et le motif de consultation N°1 en clientèle vétérinaire équine.

Au cours des 4 dernières années, l'UMR BPLC a produit 36 publications dans des revues scientifiques internationales, 18 publications dans des revues scientifiques nationales, 5 ouvrages ou chapitres d'ouvrages, 3 logiciels déposés à l'Agence pour la protection des programmes. Les membres de l'UMR BPLC ont été sollicités pour 60 conférences invitées dans des congrès internationaux (et nationaux), leurs travaux ont été récompensés par 5 prix de recherche nationaux ou internationaux.

Depuis 2005, l'équipe de Biomécanique de l'UMR BPLC concentre ses efforts sur une thématique fédératrice visant à mettre au point puis à appliquer un protocole d'évaluation biomécanique de l'effet des sols équestres sur la locomotion du cheval, dans les conditions sportives (projet Sequisol). Une étude préliminaire, soutenue par les Haras Nationaux et le Conseil Régional de Basse-Normandie, a été réalisée en 2005-2007 sur le cheval trotteur attelé. La réussite de cette étude préliminaire nous conduits à déployer à présent cette thématique vers d'autres disciplines sportives. Ce sujet de thèse s'inscrit en cela au cœur des priorités actuelles du laboratoire.

## Références des encadrants

Nathalie Crevier-Denoix est Docteur Vétérinaire et Professeur en Anatomie à l'Ecole Vétérinaire d'Alfort (depuis 1999). Agrégée en Anatomie (1993), elle a soutenu en 1996 une thèse de Doctorat d'Université en Biomécanique (Paris XI, Orsay) portant sur la caractérisation des propriétés mécaniques de tendons sains et lésés chez le Cheval. Elle a encadré depuis 1 thèse de Doctorat d'Université (soutenue en 2005, Ecole doctorale 3C, Paris VI), 7 DEA-Master (dont 2 de l'ENSAM), et 12 thèses de Doctorat Vétérinaire portant sur ses thèmes de recherche. Elle est co-inventeur d'un procédé breveté (procédé ultrasonore non-invasif de mesure de la force qui s'exerce dans un tendon au cours du mouvement). Elle dirige l'UMR INRA-ENVA de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval depuis 2003, après en avoir été directeur adjoint de 1999 à 2003.

Henry Chateau est Maître de Conférences en Anatomie à l'Ecole Vétérinaire d'Alfort. Docteur vétérinaire, titulaire d'un DEA et d'un Doctorat de biomécanique (Paris XI), il mène depuis 1997 des travaux de recherche en biomécanique équine au sein de l'UMR BPLC. Ses champs de compétences couvrent plus particulièrement l'analyse du mouvement (cinématique articulaire 3D), l'accélérométrie et ses applications à l'analyse des chocs, le développement de méthodes de quantification de la symétrie locomotrice. Depuis l'année 2005 (date d'origine du projet Sequisol), Henry Chateau a encadré 2 étudiants ingénieurs en stage de fin d'études (dont un Master), 3 ingénieurs recrutés en tant qu'IR pour le développement et la mise en œuvre du fer dynamométrique et 2 étudiantes vétérinaires dans le cadre de leur thèse de Doctorat Vétérinaire.

---

## Bibliographie existant autour du sujet proposé

La liste ci-dessous n'est pas exhaustive. Elle donne un aperçu des principaux travaux réalisés dans les domaines cités ayant un rapport direct avec le sujet proposé.

### Analyse biomécanique du saut d'obstacle

- Bobbert MF, Santamaria S. Contribution of the forelimbs and hindlimbs of the horse to mechanical energy changes in jumping. *J Exp Biol.* 2005 Jan;208(Pt 2):249-60.
- Cassiat G, Pourcelot P, Tavernier L, Geiger D, Denoix JM, Degueurce D. Influence of individual competition level on back kinematics of horses jumping a vertical fence. *Equine Vet J.* 2004 Dec;36(8):748-53.
- Dutto DJ, Hoyt DF, Clayton HM, Cogger EA, Wickler SJ. Moments and power generated by the horse (*Equus caballus*) hind limb during jumping. *J Exp Biol.* 2004 Feb;207(Pt 4):667-74.
- Leach DH, Ormrod K, Clayton HM. Stride characteristics of horses competing in Grand Prix jumping. *Am J Vet Res.* 1984 May;45(5):888-92.
- Meershoek LS, Roepstorff L, Schamhardt HC, Johnston C, Bobbert MF. Joint moments in the distal forelimbs of jumping horses during landing. *Equine Vet J.* 2001 Jul;33(4):410-5.
- Meershoek LS, Schamhardt HC, Roepstorff L, Johnston C. Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Vet J Suppl.* 2001 Apr;(33):6-10.
- Santamaria S, Bobbert ME, Back W, Barneveld A, van Weeren PR. Variation in free jumping technique within and among horses with little experience in show jumping. *Am J Vet Res.* 2004 Jul;65(7):938-44.
- Schamhardt HC, Merckens HW, Vogel V, Willekens C. External loads on the limbs of jumping horses at take-off and landing. *Am J Vet Res.* 1993 May;54(5):675-80.

### Fer dynamométrique

- Barrey E. Investigation of the vertical hoof force distribution in the equine forelimb with an instrumented horseboot. *Equine Vet J Suppl.* 1990 Jun;(9):35-8.
- Judy CE, Galuppo LD, Snyder JR, Willits NH. Evaluation of an in-shoe pressure measurement system in horses. *Am J Vet Res.* 2001 Jan;62(1):23-8.
- Kai M, Aoki O, Hiraga A, Oki H, Tokuriki M. 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.* 2000 Aug;61(8):979-85.
- Kai M, Takahashi T, Aoki O, Oki H. Influence of rough track surfaces on components of vertical forces in cantering thoroughbred horses. *Equine Vet J Suppl.* 1999 Jul;30:214-7.
- Roepstorff L, Drevemo S. Concept of a force-measuring horseshoe. *Acta Anat (Basel).* 1993;146(2-3):114-9.
- Roland ES, Hull ML, Stover SM. Design and demonstration of a dynamometric horseshoe for measuring ground reaction loads of horses during racing conditions. *J Biomech.* 2005 Oct;38(10):2102-12.

Rollot Y, Lecuyer E, Chateau H, Crevier-Denoix N. Development of a 3D model of the equine distal forelimb and of a GRF shoe for noninvasive determination of in vivo tendon and ligament loads and strains. *Equine Vet J*. 2004 Dec;36(8):677-82.

### **Accélérométrie du sabot, analyse du choc à l'impact**

Benoit P, Barrey E, Regnault JC, Brochet JL. Comparison of the damping effect of different shoeing by the measurement of hoof acceleration. *Acta Anat (Basel)*. 1993;146(2-3):109-13.

Burn JF, Wilson A, Nason GP. Impact during equine locomotion: techniques for measurement and analysis. *Equine Vet J Suppl*. 1997 May;(23):9-12.

Burn JF. Time domain characteristics of hoof-ground interaction at the onset of stance phase. *Equine Vet J*. 2006 Nov;38(7):657-63.

Ratzlaff MH, Wilson PD, Hutton DV, Slinker BK. Relationships between hoof-acceleration patterns of galloping horses and dynamic properties of the track. *Am J Vet Res*. 2005 Apr;66(4):589-95.

Ryan CT, Schaer BL, Nunamaker DM. A novel wireless data acquisition system for the measurement of hoof accelerations in the exercising horse. *Equine Vet J*. 2006 Nov;38(7):671-4.

Willemen MA, Jacobs MW, Schamhardt HC. In vitro transmission and attenuation of impact vibrations in the distal forelimb. *Equine Vet J Suppl*. 1999 Jul;30:245-8.

### **Mesure des forces tendineuses**

Crevier-Denoix N., Ravary B., Denoix J.-M., Pourcelot P. Acoustodynamométrie : Un procédé innovant de mesure non-invasive de la force qui s'exerce dans un tendon au cours du mouvement. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, 160, 1, 25-31.

Jansen MO, van den Bogert AJ, Riemersma DJ, Schamhardt HC. In vivo tendon forces in the forelimb of ponies at the walk, validated by ground reaction force measurements. *Acta Anat (Basel)*. 1993;146(2-3):162-7.

Meershoek LS, Lanovaz JL, Schamhardt HC, Clayton HM. Calculated forelimb flexor tendon forces in horses with experimentally induced superficial digital flexor tendinitis and the effects of application of heel wedges. *Am J Vet Res*. 2002 Mar;63(3):432-7.

Meershoek LS, Schamhardt HC, Roepstorff L, Johnston C. Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Vet J Suppl*. 2001 Apr;(33):6-10.

Pourcelot P, Defontaine M, Ravary B, Lematre M, Crevier-Denoix N. A non-invasive method of tendon force measurement. *J Biomech*. 2005 Oct;38(10):2124-9.

Riemersma DJ, van den Bogert AJ, Jansen MO, Schamhardt HC. Tendon strain in the forelimbs as a function of gait and ground characteristics and in vitro limb loading in ponies. *Equine Vet J*. 1996 Mar;28(2):133-8.

### **Détection de boiterie, analyse accélérométrique de la locomotion**

Keegan KG, Yonezawa Y, Pai PF, Wilson DA. Accelerometer-based system for the detection of lameness in horses. *Biomed Sci Instrum*. 2002;38:107-12.

Leleu C, Bariller F, Cotrel C, Barrey E. Reproducibility of a locomotor test for trotter horses. *Vet J*. 2004 Sep;168(2):160-6.

Pfau T, Witte TH, Wilson AM. A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *J Exp Biol*. 2005 Jul;208(Pt 13):2503-14.

Pourcelot P, Audigié F, Degueurce C, Denoix J-M, Geiger D Kinematic symmetry index: a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. *Vet Res*. 1997 28: 525-38.

Weishaupt MA, Wiestner T, Hogg HP, Jordan P, Auer JA, Barrey E. Assessment of gait irregularities in the horse: eye vs. gait analysis. *Equine Vet J Suppl*. 2001 Apr;(33):135-40.