


Année 2009



**VALIDATION D'UN SYSTÈME ACCELEROMETRIQUE DE
QUANTIFICATION DES BOITERIES CHEZ LE TROTTEUR
ATTELE DANS LES CONDITIONS DE L'EXERCICE
SPORTIF INTENSIF**

THESE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant

LA FACULTE DE MEDECINE DE CRETEIL

le ...

Par

Capucine BAILLY

Née le 11 Octobre 1983 à Harfleur (Seine-Maritime)

JURY

Président : M.

Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL

Membres

Directeur : Dr Henry CHATEAU

Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

Assesseur : Dr Fabrice AUDIGIE

Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

LISTE DES MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT

Directeur : M. le Professeur MIALOT Jean-Paul

Directeurs honoraires : MM. les Professeurs MORAILLON Robert, PARODI André-Laurent, PILET Charles, TOMA Bernard
Professeurs honoraires : MM. BRUGERE Henri, BUSSIERAS Jean, CERF Olivier, CLERC Bernard, LE BARS Henri, MILHAUD Guy, ROZIER Jacques,

DEPARTEMENT DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET PHARMACEUTIQUES (DSBP)

Chef du département : Mme COMBRISSON Hélène, Professeur - Adjoint : Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences

<p>- UNITE D'ANATOMIE DES ANIMAUX DOMESTIQUES Mme CREVIER-DENOIX Nathalie, Professeur M. DEGUEURCE Christophe, Professeur Mme ROBERT Céline, Maître de conférences M. CHATEAU Henry, Maître de conférences*</p> <p>- UNITE DE PATHOLOGIE GENERALE , MICROBIOLOGIE, IMMUNOLOGIE Mme QUINTIN-COLONNA Françoise, Professeur* M. BOULOUIS Henri-Jean, Professeur M. FREYBURGER Ludovic, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PHYSIOLOGIE ET THERAPEUTIQUE Mme COMBRISSON Hélène, Professeur* M. TIRET Laurent, Maître de conférences Mme STORCK-PILOT Fanny, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PHARMACIE ET TOXICOLOGIE Mme ENRIQUEZ Brigitte, Professeur M. TISSIER Renaud, Maître de conférences* M. PERROT Sébastien, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : ETHOLOGIE M. DEPUTTE Bertrand, Professeur</p> <p>- DISCIPLINE : ANGLAIS Mme CONAN Muriel, Professeur certifié</p>	<p>- UNITE D'HISTOLOGIE , ANATOMIE PATHOLOGIQUE M. CRESPEAU François, Professeur M. FONTAINE Jean-Jacques, Professeur * Mme BERNEX Florence, Maître de conférences Mme CORDONNIER-LEFORT Nathalie, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE VIROLOGIE M. ELOIT Marc, Professeur * Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : PHYSIQUE ET CHIMIE BIOLOGIQUES ET MEDICALES M. MOUTHON Gilbert, Professeur</p> <p>- UNITE DE GENETIQUE MEDICALE ET MOLECULAIRE M. PANTHIER Jean-Jacques, Professeur Mme ABITBOL Marie, Maître de conférences*</p> <p>- UNITE DE BIOCHIMIE M. MICHAUX Jean-Michel, Maître de conférences* M. BELLIER Sylvain, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE M. PHILIPS, Professeur certifié</p>
---	---

DEPARTEMENT D'ELEVAGE ET DE PATHOLOGIE DES EQUIDES ET DES CARNIVORES (DEPEC)

Chef du département : M. POLACK Bruno, Maître de conférences - Adjoint : M. BLOT Stéphane, Maître de conférences

<p>- UNITE DE MEDECINE M. POUCHELON Jean-Louis, Professeur* Mme CHETBOUL Valérie, Professeur M. BLOT Stéphane, Maître de conférences M. ROSENBERG Charles, Maître de conférences Mme MAUREY Christelle, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE CLINIQUE EQUINE M. DENOIX Jean-Marie, Professeur M. AUDIGIE Fabrice, Maître de conférences* Mme GIRAUDET Aude, Praticien hospitalier Mme MESPOULHES-RIVIERE Céline, Maître de conférences contractuel Mme PRADIER Sophie, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE DE REPRODUCTION ANIMALE Mme CHASTANT-MAILLARD Sylvie, Maître de conférences (rattachée au DPASP) M. NUDELMANN Nicolas, Maître de conférences M. FONTBONNE Alain, Maître de conférences* M. REMY Dominique, Maître de conférences (rattaché au DPASP) M. DESBOIS Christophe, Maître de conférences Mme CONSTANT Fabienne, Maître de conférences (rattachée au DPASP) Mme DEGUILLAUME Laure, Maître de conférences contractuel (rattachée au DPASP)</p> <p>- DISCIPLINE : URGENCE SOINS INTENSIFS Mme Françoise ROUX, Maître de conférences contractuel</p>	<p>- UNITE DE PATHOLOGIE CHIRURGICALE M. FAYOLLE Pascal, Professeur * M. MAILHAC Jean-Marie, Maître de conférences M. NIEBAUER Gert, Professeur contractuel Mme VIATEAU-DUVAL Véronique, Maître de conférences Mme RAVARY-PLUMIOEN Bérangère, Maître de conférences (rattachée au DPASP) M. ZILBERSTEIN Luca, Maître de conférences contractuel M. JARDEL Nicolas, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE D'IMAGERIE MEDICALE Mme BEGON Dominique, Professeur* Mme STAMBOULI Fouzia, Praticien hospitalier</p> <p>- DISCIPLINE : OPHTALMOLOGIE Mme CHAHORY Sabine, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PARASITOLOGIE ET MALADIES PARASITAIRES M. CHERMETTE René, Professeur * M. POLACK Bruno, Maître de conférences M. GUILLOT Jacques, Professeur Mme MARIIGNAC Geneviève, Maître de conférences Mme HALOS Lénaïg, Maître de conférences M. HUBERT Blaise, Praticien hospitalier</p> <p>- DISCIPLINE : NUTRITION-ALIMENTATION M. PARAGON Bernard, Professeur M. GRANDJEAN Dominique, Professeur</p>
--	--

DEPARTEMENT DES PRODUCTIONS ANIMALES ET DE LA SANTE PUBLIQUE (DPASP)

Chef du département : M. MAILLARD Renaud, Maître de conférences - Adjoint : Mme DUFOUR Barbara, Maître de conférences

<p>- UNITE DES MALADIES CONTAGIEUSES M. BENET Jean-Jacques, Professeur* Mme HADDAD/ HOANG-XUAN Nadia, Maître de conférences Mme DUFOUR Barbara, Maître de conférences</p> <p>- UNITE D'HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE M. BOLNOT François, Maître de conférences * M. CARLIER Vincent, Professeur Mme COLMIN Catherine, Maître de conférences M. AUGUSTIN Jean-Christophe, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : BIOSTATISTIQUES M. SANAA Moez, Maître de conférences</p>	<p>- UNITE DE ZOOTECHNIE, ECONOMIE RURALE M. COURREAU Jean-François, Professeur M. BOSSE Philippe, Professeur Mme GRIMARD-BALLIF Bénédicte, Professeur Mme LEROY Isabelle, Maître de conférences M. ARNE Pascal, Maître de conférences M. PONTER Andrew, Maître de conférences*</p> <p>- UNITE DE PATHOLOGIE MEDICALE DU BETAIL ET DES ANIMAUX DE BASSE-COUR M. MILLEMANN Yves, Maître de conférences Mme BRUGERE-PICOUX Jeanne, Professeur (rattachée au DSBP) M. MAILLARD Renaud, Maître de conférences M. ADJOU Karim, Maître de conférences*</p>
--	--

* Responsable de l'Unité

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur,

De la faculté de Médecine de Créteil, qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse,

Hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur Henry Chateau,

De l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, qui m'a fait l'honneur et le plaisir de diriger cette thèse. Je vous remercie beaucoup pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour la motivation et la grande disponibilité que vous avez démontrées tout au long de son élaboration. Votre soutien, votre respect et votre gentillesse m'ont beaucoup touchée,

Remerciements chaleureux.

A Monsieur le Docteur Fabrice Audigié,

De l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, qui m'a fait l'honneur et le plaisir d'être mon assesseur. Pour votre grande disponibilité et vos conseils avisés, et aussi pour votre soutien chaleureux pendant mon année d'internat,

Toute ma gratitude.

A Toute l'équipe de l'UMR de « Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval »,

De l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort. Pour leur aide précieuse tant pour la récolte que pour l'exploitation des données, et pour leur grande gentillesse,

Remerciements chaleureux.

A Monsieur le Professeur Jean-Marie Denoix, et à toute l'équipe du CIRALE, Fabrice, Maéva, David et Anne-Gaëlle,

Pour votre aimable participation à cette étude expérimentale, et pour la grande patience dont vous avez fait preuve lors de la lecture des séquences vidéo, mais aussi pour la passion de la pathologie locomotrice que vous m'avez transmise au cours de mon internat,

Remerciements chaleureux.

REMERCIEMENTS PERSONNELS

A mes parents, pour m'avoir fait confiance et m'avoir soutenu dans tous mes projets. Q'ils sachent combien je les admire et combien je les aime !

A mes frères et sœurs, pour leur soutien, leur joie de vivre et tous nos moments de complicité passés et futurs !

A Zabeth, qui a fait naître en moi la passion des chevaux et a toujours été là pour orienter mes pas et débroussailler mon chemin.

A Mam et A Mannick, pour leurs encouragements constants.

A mes grand-pères, oncles et tantes, cousins et cousines, pour leur présence à mes côtés.

A Esteban, pour son amour. Que l'avenir nous réserve encore pleins de surprises !

*A tous mes amis véto*s,

A Lise, ma « coloc internationale », qui par son bon cœur et sa sensibilité envers les autres, a changé mon regard sur la vie. Tu me manques.

A Baudy, pour sa gentillesse exemplaire et son soutien infailible. Tu comptes beaucoup pour moi.

A mon groupe de clinique et au groupe « 69 », pour tous les merveilleux souvenirs que nous partageons de ces 6 années. A Nathalie, notre petite princesse et grande organisatrice ! ; à Kartooch, que je ne me lasse pas d'attendre ! ; à Maud, ma conseillère personnelle qui guide mes pas dans le dur monde des chevaux ; à Despé, Jack's et Frenz, mes tombeurs préférés ! ; à Lo, qui me manque énormément au fin fond de sa campagne ; à Jeannot, serein et philosophe en toute situation ; à Audrey, LN, Caro, Minh, Mushi, Johanna,.... Merci pour les très bons moments passés et à venir, pour notre précieuse amitié. J'espère que nos chemins continueront de se croiser encore longtemps !

A mes confrères d'équine, Maud, Pie, FX, Clem, Pito et Maeva pour notre passion partagée !

A tous mes amis d'enfance, Guillaume, Dorothée, Aude... qui restent proches à mon cœur malgré l'éloignement.

A toute l'équipe de l'internat d'équine d'Alfort, Aude, Céline, Sophie, Sarah, Mr Denoix, Fabrice, Dave, Virginie, Sandrine, David et Maeva, qui m'ont encadrée et guidée avec patience et gentillesse tout au long de cette année.

A toute l'équipe de « La Nouvetière », Isa, Claudia, Valter, Guy, Margo et Jacky, qui m'ont si bien accueillie pour mes premiers pas sur le terrain !

A tous ceux qui ont fait un bout de chemin avec moi, amis d'un jour ou d'une vie.

VALIDATION D'UN SYSTEME ACCELEROMETRIQUE DE QUANTIFICATION DES BOITERIES CHEZ LE TROTTEUR ATTELE DANS LES CONDITIONS DE L'EXERCICE SPORTIF INTENSIF

Nom : BAILLY

Prénom : Capucine

Résumé :

Compte tenu du caractère subjectif de l'évaluation d'une boiterie à l'œil nu, il est utile de disposer de méthodes objectives de quantification de la symétrie locomotrice, et particulièrement dans les conditions de l'exercice sportif intensif. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de mettre en place et de valider une méthode accélérométrique de quantification des boiteries chez le trotteur attelé à grande vitesse, de vérifier sa simplicité d'utilisation et de comparer les résultats obtenus à ceux fournis par l'évaluation des cliniciens. Pour cela, un système ambulatoire, constitué de capteurs accélérométriques miniatures, autonomes et synchronisés, fixés sur le harnais et sur la croupe, a été développé. Ce système a été testé sur 12 Trotteurs Français, boiteux, attelés, lors de leur examen locomoteur sur piste à grande vitesse. Des indices de symétrie et de latéralisation ont été calculés à partir du déplacement vertical instantané des capteurs, et comparés à une évaluation clinique standard sur vidéo.

Les résultats montrent que le système est très facile et rapide à utiliser, et donc bien adapté à une utilisation sur le terrain. La corrélation entre les indices de symétrie et de latéralisation, et l'évaluation clinique, est linéaire et statistiquement significative ($p < 0,001$) pour la quasi totalité des paramètres. Les résultats se sont révélés moins bons pour l'identification des boiteries antérieures ; cependant la confirmation de ce résultat nécessiterait de poursuivre les tests sur un effectif de chevaux présentant des boiteries antérieures plus marquées.

La méthode accélérométrique constitue un bon outil diagnostic complémentaire à portée du clinicien. Ses principaux avantages sont de fournir une quantification utile pour objectiver tout examen comparatif (évaluation d'une anesthésie diagnostique, d'un résultat thérapeutique,...) et d'apporter une aide précieuse lorsque les conditions d'observation sont difficiles (examen à grande vitesse par exemple).

Mots clés :

BOITERIE / SYMETRIE LOCOMOTRICE / QUANTIFICATION / ACCELEROMETRIE / EXERCICE / EQUIDE / CHEVAL / CHEVAL DE COURSE / TROTTEUR

Jury :

Président : Pr.

Directeur : Dr. H. CHATEAU

Assesseur : Dr F. AUDIGIE

Adresse de l'auteur :

Mlle Capucine BAILLY

Allée de la Coupelière

Hameau d'Emfrayette

76290 Fontaine-la-Mallet - FRANCE

VALIDATION OF AN ACCELEROMETRIC DEVICE FOR LAMENESS QUANTIFICATION APPLIED IN FRENCH TROTTERS IN INTENSIVE TRAINING CONDITION

Surname : BAILLY

Given name : Capucine

Summary :

Because lameness evaluation from human observation is subjective, methods to objectively quantify lameness of the horse are highly desirable, especially in intensive training condition. The objective of this study was to design and validate an accelerometric method for lameness quantification in harness trotters at high speed, to compare the results with those obtained with a standard clinical evaluation on video.

An ambulatory system, made of synchronised miniature and autonomous accelerometers, attached to the harness and the sacrum, was developed. This system was tested in 12 French Trotters during their clinical examination on a racing track. Symmetry and lateralization indices were calculated from the instantaneous vertical displacement of the accelerometers, and were compared to standard clinical evaluation from videotapes.

The results demonstrated the simplicity and quickness of use of the device, allowing application in field condition. Correlation between symmetry and lateralization indices, and clinical evaluation, was linear and statistically significant ($p < 0,001$) for nearly all parameters. Results were not so good for forelimb lameness identification ; but confirmation of this result would need to include and test more horses with more pronounced forelimb lameness.

The accelerometric method developed in this study seems to be useful complementary diagnostic tool for clinicians, which enable objective comparison of lameness grade (for diagnostic anaesthesia or treatment evaluation,...) and gives precious information when direct observation is difficult (during an high-speed examination for example).

Keywords :

LAMENESS / GAIT SYMMETRY / QUANTIFICATION / ACCELEROMETRY /
TRAINING / EQUIDAE / HORSE / RACE HORSE / FRENCH TROTTOR

Jury :

President : Pr.

Director : Dr. H. CHATEAU

Assessor : Dr F. AUDIGIE

Author's address :

Miss Capucine BAILLY

Allée de la Coupelière

Hameau d'Emfrayette

76290 Fontaine-la-Mallet – France

TABLE DES MATIERES

INDEX DES FIGURES ET DES TABLEAUX	- 5 -
INTRODUCTION.....	- 7 -
PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : L'ETUDE QUANTITATIVE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL.	- 9 -
I. INTERETS D'UNE ETUDE OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL.....	- 11 -
A. Principes de l'examen clinique du cheval dans le cadre du diagnostic d'un trouble locomoteur	- 11 -
1. Examen standard à petite vitesse.....	- 11 -
a. Déroulement de l'examen	- 11 -
b. Intensité de la boiterie	- 12 -
c. Identification du(des) membre(s) boiteux	- 13 -
(1) Boiteries simples, d'appui	- 13 -
(2) Boiteries à sièges multiples	- 13 -
2. Examen dans les conditions de l'exercice sportif	- 14 -
3. Conclusion	- 14 -
B. Fiabilité de l'observation directe dans l'évaluation des boiteries du cheval	- 14 -
C. Intérêts d'une méthode objective d'évaluation de la locomotion équine.....	- 16 -
1. Intérêts de la mesure quantitative de la boiterie en complément de l'examen clinique traditionnel	- 16 -
a. Utilisation sur le terrain des méthodes de mesures quantitatives	- 16 -
b. Evaluation objective de l'évolution d'une pathologie et de l'efficacité d'un traitement.....	- 16 -
c. Evaluation objective des résultats des anesthésies diagnostiques	- 16 -
d. Les visites d'achat et les expertises judiciaires	- 17 -
e. Les expertises sur le terrain.....	- 17 -
f. Evaluation objective de l'efficacité d'un médicament en vue de sa mise sur le marché.....	- 17 -
2. Etude de la locomotion d'un cheval à grande vitesse.....	- 18 -
3. Intérêts de l'évaluation de la locomotion dans la prévision du potentiel sportif d'un jeune cheval.....	- 18 -
4. Conclusion	- 18 -
II. LES DIFFERENTES METHODES OBJECTIVES D'ETUDE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL.....	- 19 -
A. Principe général des méthodes objectives d'analyse de la locomotion	- 19 -
B. Les méthodes cinématiques.....	- 19 -
1. Principe des systèmes d'analyse vidéo du mouvement	- 19 -
2. Conditions d'utilisation des Systèmes d'Analyse Vidéo du Mouvement	- 21 -
a. Piste expérimentale de mesure	- 21 -
b. Le tapis roulant à grande vitesse.....	- 21 -
c. Caméras à haute fréquence et utilisation sur le terrain	- 22 -
3. Traitement des données cinématiques pour analyser la symétrie de la locomotion du cheval.....	- 23 -
a. Analyse de Fourier et Indice de Symétrie Global (Audigié <i>et al.</i> , 2002)	- 23 -
b. Analyse de Fourier et identification du membre boiteux (Audigié <i>et al.</i> , 2002).....	- 26 -
4. Conclusion	- 29 -
C. Les méthodes cinétiques.....	- 29 -
1. Enregistrement des forces de réaction du sol.....	- 30 -
a. Les plates-formes de force	- 30 -
b. Les fers instrumentés	- 31 -
c. Les tapis roulants instrumentés	- 31 -
2. Utilisation de l'accélérométrie.....	- 31 -
a. Principe	- 31 -
b. Méthode accélérométrique permettant une analyse descriptive de la locomotion équine	- 32 -

(1) Présentation du « système Equimetrix » (Barrey <i>et al.</i> , 1994).....	- 32 -
(2) Les procédures de traitement des données accélérométriques.....	- 33 -
c. Méthode accélérométrique appliquée à la quantification des boiteries chez le cheval	- 35 -
(1) Evaluation de la symétrie à partir du tracé accélérométrique (Barrey et Desbrosse, 1996).....	- 35 -
(2) Evaluation de la symétrie à partir du tracé du déplacement de l'accéléromètre.....	- 37 -
d. Méthode accélérométrique appliquée dans les conditions de l'exercice sportif	- 38 -
(1) Méthode accélérométrique appliquée chez les chevaux de sauts d'obstacle.....	- 38 -
(2) Méthode accélérométrique appliquée chez les chevaux de course.....	- 39 -
e. Perfectionnement de la méthode accélérométrique	- 42 -
(1) Les centrales de mesures inertielles (CMI)	- 42 -
(2) Association d'une centrale de mesures inertielles (CMI) et d'un GPS	- 43 -
f. Etude comparative de la méthode accélérométrique et de la méthode cinématique	- 44 -
(1) Comparaison des 2 méthodes pour l'analyse descriptive de la locomotion.....	- 44 -
(2) Comparaison des 2 méthodes pour la quantification de la symétrie de la locomotion	- 44 -
3. Conclusion	- 45 -
D. Critères d'évaluation de la symétrie de la locomotion du cheval par les méthodes quantitatives.....	- 45 -
1. Evaluation d'une boiterie antérieure par les méthodes quantitatives	- 46 -
2. Evaluation d'une boiterie postérieure par les méthodes quantitatives	- 47 -

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE : - 51 -

VALIDATION D'UN SYSTEME ACCELEROMETRIQUE DE QUANTIFICATION DES BOITERIES CHEZ LE TROTTEUR ATTELE DANS LES CONDITIONS DE L'EXERCICE SPORTIF INTENSIF. - 51 -

I. INTRODUCTION	- 51 -
A. Contexte expérimental.....	- 51 -
B. Cahier des charges du système à mettre en oeuvre.....	- 52 -
C. Objectifs de l'étude expérimentale	- 52 -
II. MATERIEL ET METHODE	- 53 -
A. Matériel	- 53 -
1. Chevaux testés.....	- 53 -
2. Les accéléromètres	- 53 -
3. La caméra.....	- 54 -
B. Acquisition des données.....	- 54 -
1. Examen sur piste	- 54 -
2. Evaluation clinique de la locomotion du cheval	- 55 -
3. Données cliniques du cheval.....	- 55 -
C. Récupération et traitement des données	- 55 -
1. Données cinématiques et indices de symétrie	- 55 -
a. Transfert des données : extraction du signal depuis les cartes mémoires	- 55 -
b. Traitement des données accélérométriques à l'aide du logiciel « LocoSym »	- 56 -
(1) Saisie des informations générales	- 56 -
(2) Présélection des intervalles.....	- 56 -
(3) Intégration du signal.....	- 56 -
(4) Découpage des foulées successives et latéralisation du signal	- 57 -
(5) Calculs des paramètres d'intérêt	- 57 -
(6) Présentation des résultats.....	- 61 -
2. Evaluation clinique de la locomotion du cheval.	- 63 -
3. Analyse statistique.....	- 63 -
III. RESULTATS	- 64 -
A. Présentation des cas cliniques et des résultats cinématiques associés.	- 64 -
1. Boiterie postérieure se manifestant uniquement à grande vitesse.....	- 64 -
a. Cheval VIII.....	- 64 -
b. Cheval II.....	- 66 -
2. Boiteries postérieures se manifestant uniquement en fin de travail	- 68 -

a.	Cheval IX	- 68 -
b.	Cheval X.....	- 70 -
3.	Boiterie postérieure bilatérale alternée	- 71 -
a.	Cheval VII	- 71 -
b.	Cheval XI	- 72 -
c.	Cheval I	- 74 -
d.	Cheval IV	- 75 -
4.	Boiterie postérieure associée à une asymétrie antérieure	- 76 -
a.	Cheval VI	- 76 -
b.	Cheval V.....	- 77 -
c.	Cheval XII.....	- 79 -
5.	Autres cas : cheval III.....	- 81 -
6.	Conclusion	- 81 -
B.	Confrontation des résultats obtenus selon les 2 méthodes d'analyse : méthode accélérométrique de quantification des boiteries et évaluation clinique sur vidéo.	- 81 -
1.	Latéralisation de l'asymétrie locomotrice.....	- 83 -
2.	Gradation de l'asymétrie locomotrice	- 85 -
3.	Influence de la vitesse du cheval sur la qualité des résultats	- 90 -
TROISIEME PARTIE : DISCUSSION		- 91 -
I.	ANALYSE CRITIQUE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	- 91 -
A.	Choix portant sur le matériel	- 91 -
1.	Etude portant sur des chevaux présentés en consultation au CIRALE	- 91 -
2.	Qualités et positionnement des capteurs accélérométriques	- 91 -
a.	Capteurs accélérométriques simples et légers, avec carte mémoire intégrée.....	- 91 -
b.	Positionnement des capteurs accélérométriques	- 92 -
(1)	Accéléromètre fixé sur le harnais.....	- 92 -
(2)	Accéléromètre fixé sur le tuber sacrale	- 92 -
(3)	Accéléromètre fixé sur le boulet antérieur gauche.....	- 93 -
B.	Choix portant sur la méthode.....	- 93 -
1.	Traitement du signal accélérométrique.....	- 93 -
2.	Comparaison du système accélérométrique à l'évaluation clinique sur vidéo	- 94 -
II.	ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS OBTENUS.....	- 96 -
A.	Adaptation du système accélérométrique aux conditions d'exercice sportif	- 96 -
B.	Qualité des résultats fournis par le système accélérométrique	- 96 -
1.	Analyse des discordances observées entre la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique.	- 96 -
2.	Comparaison des résultats obtenus à ceux publiés dans d'autres études.	- 98 -
3.	Apports complémentaires de la méthode accélérométrique	- 98 -
III.	Bilan : avantages et limites de la méthode accélérométrique.....	- 101 -
CONCLUSION		- 103 -
BIBLIOGRAPHIE.....		- 105 -
ANNEXES.....		- 111 -

INDEX DES FIGURES ET DES TABLEAUX

1 – Index des Figures :

Figure 1 : Emplacements communément utilisés pour les marqueurs lors d'une analyse cinématique (Clayton et Schamhardt, 2000)	- 20 -
Figure 2 : Analyse de Fourier appliquée au déplacement vertical d'un marqueur de la ligne du dos sur une foulée de trot (Audigié <i>et al.</i> , 2002).....	- 25 -
Figure 3 : Relation entre $\Delta\theta$ et les différents schémas descriptifs du déplacement	- 27 -
Figure 4 : Algorithme permettant de quantifier le degré de boiterie, identifier le membre boiteux et caractériser les mouvements de déplacements du tronc, chez un cheval au trot (Audigié <i>et al.</i> , 2002)	- 28 -
Figure 5 : Premières études expérimentales de la locomotion équine par Marey en 1987 (Barrey, 1999)	- 29 -
Figure 6 : Un modèle mécanique du cheval, composé des segments du corps articulés	- 32 -
Figure 7 : Courbes d'accélération longitudinale et dorsoventrale d'un cheval au trot	- 33 -
Figure 8 : Correspondance entre le tracé de l'accélération dorsoventrale,	- 34 -
Figure 9 : Courbes des accélérations dorsoventrales mesurées sur le sternum de chevaux au trot (Barrey et Desbrosse, 1996)	- 36 -
Figure 10 : Mesures accélérométriques pour la quantification des boiteries	- 37 -
Figure 11 : Correspondance entre les différentes phases du saut et le tracé accélérométrique	- 39 -
Figure 12 : Correspondance entre les images vidéo et les courbes d'accélération dorsoventrale, longitudinale et latéro-médiale	- 41 -
Figure 13 : Positionnement des 3 accéléromètres sur le trotteur.....	- 54 -
Figure 14 : Démarche conduisant du signal brut au déplacement.....	- 57 -
Figure 15 : Analyse de Fourier appliquée au déplacement vertical d'un marqueur de la ligne du dos sur une foulée de trot (Audigié <i>et al.</i> , 2002).....	- 58 -
Figure 16 : Tracé du déplacement vertical de la croupe en fonction du temps, chez un cheval présentant une locomotion postérieure symétrique.....	- 59 -
Figure 17 : Tracé du déplacement vertical de la croupe en fonction du temps, chez le même cheval, à grande vitesse (55km/h) : apparition d'une boiterie postérieure droite.....	- 60 -
Figure 18 : Présentation des résultats par intervalle d'étude et par cheval	- 62 -
Figure 19 (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval VIII,	- 65 -
Figure 20 (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval II,	- 67 -
Figure 21 : (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval IX.....	- 69 -
Figure 22 : (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval X.....	- 70 -
Figure 23 : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval VII,.....	- 71 -
Figure 24 : Tracés des déplacements verticaux du garrot et de la croupe du cheval XI :.....	- 73 -
Figure 25 (A,B) : Comparaison des tracés du déplacement vertical de la croupe	- 74 -
Figure 26 : (A,B) : Tracés du déplacement vertical de la croupe du cheval IV,	- 75 -
Figure 27 : Tracés des déplacements verticaux du garrot et de la croupe du cheval VI	- 76 -
Figure 28 : Déplacement verticaux du garrot et de la croupe du cheval V présentant une boiterie postérieure gauche et un soulagement antérieur droit, caractérisé par :	- 78 -
Figure 29 : Tracés des déplacements verticaux du garrot et de la croupe du cheval XII, présentant une boiterie postérieure droite et :	- 80 -
Figure 30 : Tracé de l'ISG en fonction de l'ISA pour les Antérieurs	- 86 -

Figure 31 : Tracé de l'ISG en fonction de l'ISA pour les Postérieurs	- 86 -
Figure 32 : Tracé de l'ISG en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Antérieurs.....	- 87 -
Figure 33 : Tracé de l'ISA en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Antérieurs.....	- 87 -
Figure 34 : Tracé de l'ILat en fonction du Grade de boiterie Clinique Latéralisé,.....	- 88 -
Figure 35 : Tracé de l'ILat en fonction du Grade de boiterie Clinique Latéralisé,.....	- 88 -
Figure 36 : Tracé de l'ISG en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Postérieurs.....	- 89 -
Figure 37 : Tracé de l'ISA en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Postérieurs.....	- 89 -
Figure 38 : Tracé du déplacement vertical du garrot du cheval VI se déplaçant au trot à 45 km/h (intervalle VI ₆) : ISG = 88% ; ISA = 99%	- 98 -

2 – Index des Tableaux :

Tableau 1 : Gradation de la boiterie selon l'American Association of Equine Practitioners (1991).....	- 12 -
Tableau 2 : Gradation de la boiterie selon 5 grades (Weishaupt <i>et al.</i> , 2001).....	- 13 -
Tableau 3 : Présentation des chevaux de l'étude.....	- 53 -
Tableau 4 : Données cinématiques correspondant au tracé ci-dessus (Figure 17).....	- 60 -
Tableau 5 (A) : Synthèse des résultats fournis par la méthode accélérométrique.....	- 82 -
Tableau 6 : Latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique	- 84 -
Tableau 7 : Latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique	- 84 -
Tableau 8 : Corrélation entre les indices de symétrie et de latéralisation	- 90 -
Tableau 9 : Calculs des coefficients de corrélation entre les indices de symétrie et de latéralisation de la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique,	- 90 -

INTRODUCTION

Les pathologies locomotrices représentent une part importante de la médecine vétérinaire équine, en particulier chez le cheval de sport. Les boiteries sont un facteur majeur de pertes économiques pour les propriétaires et les entraîneurs des chevaux athlètes. Cet enjeu économique justifie l'effort important développé pour la détection des boiteries et pour la prévention des affections locomotrices.

Au cours des quinze dernières années, les techniques d'imagerie ont très nettement progressé, permettant un diagnostic lésionnel de plus en plus précis ; elles permettent maintenant d'examiner la plupart des régions corporelles du cheval et les différents tissus anatomiques de chaque région (Denoix et Audigié, 2004). Cependant, pour fournir des informations pertinentes, ces techniques doivent être appliquées aux régions présentant les lésions responsables des troubles locomoteurs du cheval. Or, l'évaluation de la boiterie en elle-même, au cours de l'examen clinique du cheval, reste le plus souvent basée sur l'observation du clinicien. Celui-ci effectue un examen visuel pour évaluer la symétrie locomotrice de façon qualitative. Dans certaines circonstances, il serait intéressant de disposer d'une information quantifiée, qui réduirait le caractère subjectif d'une observation directe. C'est pourquoi, les recherches se sont portées vers l'étude de systèmes permettant de mesurer les boiteries de manière quantitative. L'analyse quantitative, loin de remplacer l'analyse clinique, toujours prépondérante, la complète en apportant une valeur chiffrée.

L'étude de méthodes quantitatives d'analyse de la locomotion du cheval remonte à la fin du XIX^{ème} siècle ; elles ont permis un enrichissement important des connaissances sur la locomotion du cheval. Les méthodes actuelles réclament souvent un matériel encombrant et onéreux, surtout adapté à une application dans le cadre de la recherche. Dans le cadre d'une application pratique en clinique, l'utilisation d'un matériel plus simple est souhaitable.

C'est l'objectif de la méthode accélérométrique de quantification des boiteries présentée dans cette étude, qui est ici appliquée sur le trotteur de course, lors d'un exercice sportif intensif. Le système de mesure devrait permettre une évaluation de la symétrie des mouvements locomoteurs du cheval au trot à grande vitesse, ce qui est très difficile pour le clinicien, l'œil humain ne permettant pas de suivre et de décomposer des mouvements aussi rapides. Cette méthode a donc été étudiée pour être utilisée sur le terrain, rapidement et facilement. L'objectif de l'étude est de présenter l'application de cette méthode sur le trotteur de course, de vérifier sa simplicité d'utilisation et de comparer les résultats obtenus à ceux fournis par l'évaluation des cliniciens.

L'exposé commence par une étude bibliographique de l'analyse quantitative de la locomotion du cheval, dans laquelle seront présentés, l'intérêt d'une mesure objective et ses différentes applications possibles, puis une revue des diverses méthodes de mesure. Dans une seconde partie, l'exposé se poursuit par la présentation de l'étude expérimentale portant sur la méthode accélérométrique de quantification des boiteries appliquée sur le trotteur de course. Enfin, la dernière partie de ce travail consiste en une discussion sur la méthode employée, ses intérêts, ses limites et ses applications potentielles.

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : L'étude quantitative de la locomotion du cheval.

L'étude de la locomotion du cheval n'est pas un sujet nouveau ! Aristote (384-322 avant JC) décrivait déjà l'anatomie de l'appareil locomoteur avec de nombreux détails. Au cours du XVI^{ème}-XVII^{ème} siècle, le développement de plusieurs écoles d'équitation en Italie, en Espagne, au Portugal et en France a permis d'augmenter les connaissances sur la conformation du cheval, l'intérêt étant de l'utiliser dans les écoles académiques et pour les fonctions militaires. La première approche scientifique date du XVIII^{ème} siècle, avec des vétérinaires tels que Bourgelat (1754). L'utilisation du cheval déclina au début du XX^{ème} siècle avec le développement des machines, mais depuis ces 40 dernières années, l'intérêt croissant des chevaux pour les courses ou les activités sportives (dressage, CSO, complet, endurance) a stimulé la recherche scientifique en biomécanique équine.

Les premières mesures portant sur la locomotion équine sont également très anciennes : à la fin du XIX^{ème} siècle, Marey fût un des premiers à étudier les différentes allures du cheval en utilisant une méthode chronophotographique. Dans la même période, Muybridge utilisa une série d'appareils photos déclenchés successivement pour analyser le geste du cheval en mouvement. L'étude de la locomotion du cheval de manière objective, à l'aide de dispositifs de mesure, permet un enrichissement des connaissances très important sur le fonctionnement de l'appareil locomoteur, et a ainsi une utilisation spécifique en recherche fondamentale. De plus, l'analyse objective de la locomotion présente également de nombreux intérêts pour une application clinique. Ainsi, dans un premier temps, nous verrons quels sont les intérêts d'une méthode d'analyse objective de la locomotion, après une présentation succincte de la démarche d'un examen clinique traditionnel, et des problèmes rencontrés par les cliniciens du fait de l'approche subjective de cet examen. Puis, dans un deuxième temps, nous verrons les méthodes qui ont été développées entre la fin du XIX^{ème} siècle et aujourd'hui pour analyser objectivement la locomotion du cheval. Ces méthodes peuvent être divisées en deux grands groupes : les méthodes cinématiques, qui étudient les mouvements dans l'espace des différents segments du corps, et les méthodes cinétiques, qui étudient la cause du mouvement, c'est-à-dire les forces appliquées au corps.

I. INTERETS D'UNE ETUDE OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL

A. Principes de l'examen clinique du cheval dans le cadre du diagnostic d'un trouble locomoteur

Les troubles locomoteurs sont un motif fréquent de consultation en clinique équine. Ils sont le premier facteur responsable d'une diminution des performances et de l'utilisation d'un cheval (Barrey et Desbrosse, 1996). De ce fait, les praticiens équins examinent quotidiennement des boiteries et se retrouvent confrontés aux difficultés inhérentes à leur diagnostic et à leur gestion. La boiterie est traditionnellement évaluée par l'observation de facteurs tels que des changements sur la longueur de la foulée, et sur la durée de la phase d'appui du membre, la symétrie des déplacements verticaux de la tête et de la croupe, les mouvements de l'encolure, et l'angle de flexion des articulations. Si ces facteurs sont enregistrés, il devient alors possible de comparer différents chevaux ou le même cheval à différentes occasions. Le diagnostic des boiteries comporte deux étapes essentielles : la localisation de la douleur (diagnostic topographique) et l'identification de la nature de la lésion (diagnostic lésionnel). Ainsi, le diagnostic repose sur la mise en œuvre d'étapes sémiologiques successives : recueil de l'anamnèse, examen statique et examen dynamique, qui doivent être effectués avec précision et rigueur, afin de définir au mieux les examens complémentaires à envisager (Denoix, 1992).

L'anamnèse est un élément très important de la consultation, qui peut apporter de nombreuses informations et peut mettre en lumière un certain nombre d'éléments clés (Denoix, 1992). L'examen statique fait appel à l'inspection, la palpation, la pression et la mobilisation. L'analyse de tous ces éléments réclame une observation très attentive du cheval, sous l'œil exercé du clinicien. Celui-ci acquiert une sensibilité d'observation de plus en plus fine au fur et à mesure de son exercice, et perfectionne ainsi l'acquisition d'informations (Denoix, 1992). L'examen dynamique, qui suit l'examen statique, constitue une étape essentielle de l'examen clinique. C'est à cette étape que des méthodes d'analyse objectives de la locomotion peuvent éventuellement être mises en place pour compléter l'évaluation subjective du clinicien. L'examen dynamique correspond le plus souvent à un examen standard à petite vitesse ; néanmoins, peut y être associé un examen dans les conditions de l'exercice sportif, qui apporte des informations supplémentaires pertinentes, car c'est souvent dans ces circonstances plus extrêmes que les troubles locomoteurs à l'origine de contre-performances se manifestent.

1. Examen standard à petite vitesse

a. Déroulement de l'examen

L'examen dynamique qui suit l'examen statique commence dès les premières foulées du cheval. Il s'effectue à différentes allures, chacune apportant un nouvel élément d'analyse. Le pas, en raison de la lenteur des déplacements, permet une étude fine des déficits locomoteurs. Le trot, en raison de la symétrie de l'allure, permet l'identification des membres les plus boiteux. Le galop sur terrain souple permet d'étudier la souplesse de la colonne vertébrale et le déplacement des membres pelviens (Denoix, 1992). Au cours de l'observation directe du

cheval, il faut évaluer et décrire de nombreux critères : les asymétries, les défauts de mise en charge d'un membre, et les anomalies de la foulée (défauts de protraction, défauts de propulsion, anomalies de trajectoire des membres au soutien, mouvements d'abduction ou d'adduction). Pour cela, le cheval est placé dans diverses conditions : aux trois allures ; sur terrain dur ou terrain mou ; sur huit de chiffre, ligne droite et cercles aux deux mains... (Denoix, 1992). Cette analyse permet de caractériser la boiterie et de déterminer le membre boiteux, et parfois l'étage de la lésion pour les cliniciens les plus expérimentés. Pour confirmer ces hypothèses, des tests de mobilisation peuvent être effectués.

Ainsi, tout comme l'examen statique, l'examen dynamique réclame une grande finesse d'observation afin de percevoir tous les petits déséquilibres de la locomotion du cheval. L'examen doit être rigoureux et le plus standardisé possible pour éviter les omissions ou les fausses pistes. De plus, les gestes du clinicien lorsqu'il manipule le cheval doivent être symétriques et répétables fidèlement afin que l'interprétation ne soit pas biaisée. Certaines astuces permettent d'éviter au maximum les biais liés aux réactions de l'animal ou à l'interprétation humaine qui en découle. Par exemple, les tests de mobilisation dynamiques doivent toujours être commencés du côté opposé de la lésion. En effet, une douleur intense au cours d'un test peut par la suite modifier la réponse de l'animal aux tests suivants.

Ainsi la rigueur du clinicien tend à diminuer au maximum le facteur de subjectivité, lié à l'animal et au clinicien lui-même, mais celui-ci doit être conscient que ce facteur reste toujours présent.

b. Intensité de la boiterie

En complément de la standardisation de l'examen, une codification des différents grades de boiteries est intéressante afin de pouvoir observer leur évolution. Il existe différentes échelles de codification des boiteries.

Voici la gradation de la boiterie selon l'American Association of Equine Practitioners (Tableau 1) :

Tableau 1 : Gradation de la boiterie selon l'American Association of Equine Practitioners (1991)

Degré	Définition	Description
0/4	Normal	Boiterie difficile à observer quelques soient les circonstances
1/4	Boiterie discrète	Boiterie difficile à observer au pas et au trot en ligne droite, apparente dans certaines circonstances
2/4	Boiterie modérée	Boiterie visible au trot dans toutes les circonstances
3/4	Boiterie sévère	Boiterie évidente, avec d'importantes oscillations du balancier cervico-céphalique, de la croupe, ou raccourcissement de la foulée.
4/4	Suppression d'appui	Appui minimal en mouvement et/ou au repos ; inapte à se déplacer.

Et voici un autre système de notation, utilisant 5 grades de boiteries (Weishaupt *et al.*, 2001) :

Tableau 2 : Gradation de la boiterie selon 5 grades (Weishaupt *et al.*, 2001)

Degré	Description
0/5	Normal
1/5	Absence d'irrégularités au pas ; légère irrégularité au trot, non visible sur toutes les foulées
2/5	Absence d'irrégularités au pas ; légère boiterie sur chaque foulée de trot
3/5	Légère irrégularité au pas ; boiterie modérée de trot
4/5	Boiterie modérée au pas ; boiterie sévère au trot
5/5	Suppression d'appui sur le membre affecté

Quelque soit l'échelle de notation, nous pouvons noter que, bien que les différents grades se distinguent par des critères définis, seul le dernier grade (suppression d'appui) est défini par une observation objective irréfutable (Keegan, 2007).

c. Identification du(des) membre(s) boiteux

L'étape préliminaire indispensable à toute démarche diagnostique dans le cadre des troubles de la locomotion chez le cheval est l'identification du ou des membre(s) boiteux.

(1) Boiteries simples, d'appui

Au trot, pour des boiteries antérieures, le balancier cervico-céphalique s'abaisse lors de l'appui du membre sain et il s'élève lors de l'appui du membre douloureux, pour décharger celui-ci. Par ailleurs, la répartition différentielle des charges sur les deux antérieurs entraîne une asymétrie de la descente des boulets à l'appui (Denoix, 1992).

Pour les boiteries postérieures, les charges inférieures imposées au membre douloureux président également à la même asymétrie de descente des boulets. Au niveau du bassin, les déplacements sont différents de ceux de la tête pour les membres thoraciques. A partir d'une position culminante, juste avant la battue du membre boiteux, la croupe dans son ensemble s'abaisse au cours de l'appui du membre boiteux. Le point le plus bas de la trajectoire de la croupe a lieu dans la première phase de l'appui du membre sain, qui ensuite propulse à nouveau la croupe vers le haut. Lorsqu'on examine le cheval de derrière, les déplacements verticaux du tuber coxae (angle de la hanche) sont plus amples du côté du membre douloureux que du côté opposé (Denoix, 1992). L'élévation du bassin (point abordé dans de nombreuses descriptions d'évaluation clinique de la boiterie) est le résultat de la propulsion du membre sain, qui élève le bassin à un niveau supérieur que lors de la propulsion du membre boiteux, et qui se produit juste avant l'appui du membre boiteux (Kramer *et al.*, 2004).

(2) Boiteries à sièges multiples

Les boiteries bilatérales du même bipède sont rarement de la même intensité, ce qui conduit à faire apparaître une boiterie d'appui. Cependant, les signes les plus caractéristiques consistent en un raccourcissement des foulées et une modification de la trajectoire des membres (Denoix, 1992). Ces boiteries sont beaucoup plus difficiles à mettre en évidence par les

méthodes d'analyse objective de la locomotion, qui analysent la symétrie du bipède (Pourcelot *et al.*, 1997).

Enfin, les boiteries portant à la fois sur les antérieurs et les postérieurs ont des manifestations dynamiques complexes (Denoix, 1992). Ces manifestations sont plus difficiles à interpréter pour le clinicien.

2. Examen dans les conditions de l'exercice sportif

L'examen clinique conventionnel en main ou en longe de chevaux présentant des défauts de performance est limité dans la mesure où il ne permet pas d'investiguer tous les aspects des troubles locomoteurs se manifestant à grande vitesse ou durant les épreuves de compétition. Certains troubles locomoteurs n'apparaissent en effet que dans des conditions d'exercice sub-maximales. Il est donc très intéressant de pouvoir examiner un cheval en conditions réelles d'entraînement et de compétition, afin de se mettre en situation pour identifier et analyser les altérations des allures et des mouvements sportifs à grande vitesse. Le cheval de selle peut être monté et être travaillé en dressage ou à l'obstacle ; le cheval de trot peut être attelé et présenté aux allures vives sur la piste.

Ainsi, le vétérinaire peut être amené à observer le trotteur de course sur la piste d'entraînement. Mais la piste s'étendant toujours sur une grande distance, rapidement, l'observation se fait de très loin. Pour une observation à plus courte distance, le vétérinaire peut suivre le driver en voiture, en roulant à côté de celui-ci. Une caméra embarquée peut éventuellement être utilisée pour une analyse plus fine au ralenti. Néanmoins, l'œil humain reste limité pour décomposer des mouvements très rapides (le trotteur court alors à 40-55 km/h, et chaque foulée dure moins d'une demi-seconde), et l'observation directe manque alors de précision.

3. Conclusion

Nous avons vu que la standardisation des examens (succession des différentes étapes dans un ordre rationnel), la standardisation des gestes de manipulation (toujours commencer par le côté sain, faire des manipulations symétriques,...) et des interprétations réfléchies permettent de contrecarrer les biais liés aux réactions de l'animal et aux impressions ressenties par le clinicien, qui représentent la base à partir de laquelle il doit tirer des conclusions. Le clinicien peut donc, par sa rigueur, objectiver au maximum l'examen clinique. Néanmoins, l'examen étant basé par définition sur une observation directe, la part de subjectivité restera toujours présente. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier la fiabilité de cette observation directe.

B. Fiabilité de l'observation directe dans l'évaluation des boiteries du cheval

Plusieurs études ont été effectuées pour estimer la fiabilité de l'observation directe pour évaluer les boiteries.

Keegan *et al.* (1998) ont mené une étude visant à estimer la sensibilité et la spécificité de l'évaluation, par observation directe, d'une boiterie légère, sur des chevaux examinés sur tapis roulant, et d'étudier la corrélation entre cette évaluation subjective et une analyse cinématique.

Cette étude portait sur 24 chevaux, 5 cliniquement sains et 19 présentant une boiterie antérieure, qui furent évalués plusieurs fois, avant et après une anesthésie digitale palmaire, par 6 cliniciens et 7 internes ou résidents, sur projection vidéo (obligatoirement en temps réel). L'analyse cinématique de la locomotion, assistée par ordinateur, a été menée conjointement à chaque enregistrement vidéo, en utilisant 2 caméras, pour obtenir 23 variables cinématiques. La concordance des résultats pour un même individu était dans l'intervalle espéré compte tenu de la difficulté modérée du diagnostic, et elle était supérieure pour les cliniciens ($\kappa = 0,61$) par rapport aux internes ($\kappa = 0,41$), ce qui montre que leurs évaluations sont plus répétables, du fait d'une approche plus systématique de l'examen locomoteur, acquise par l'expérience. Par contre, la concordance des résultats entre les individus était faible, à la fois pour les examinateurs non expérimentés et expérimentés ($\kappa = 0,21$ et $\kappa = 0,23$ respectivement). Enfin, la concordance de changement de notation après anesthésie, entre les individus, était très faible. Ainsi, il apparaît dans cette étude que la fiabilité dans la gradation de la boiterie est faible.

De plus, cette étude comparait les changements de notation des observateurs aux changements de valeurs des 23 variables cinématiques, et un coefficient de corrélation était calculé. Ceci a permis de montrer que les différents examinateurs ont des critères d'observations très variés, ce qui pourrait expliquer la faible concordance des résultats entre les individus. De plus, pour chaque observateur, les 3 variables cinématiques présentant la corrélation la plus élevée au niveau du changement de note ont été relevées. L'objectif de cette analyse était d'identifier les variables cinématiques les plus souvent utilisées par la majorité des cliniciens comme repères visuels pour la détermination de l'amélioration d'une boiterie. Les résultats ont montré que les 2 variables présentant la meilleure corrélation étaient la différence de hauteur minimale de la tête entre les phases d'appui de chaque antérieur, et la hauteur maximale atteinte par le sabot pendant la phase de soutien.

Arkell *et al.* (2006) ont réalisé une autre étude sur la sensibilité de la gradation des boiteries pour apprécier l'impact de la connaissance du contexte de l'évaluation. Les auteurs ont montré que l'attribution du grade de boiterie est influencé par le fait que l'examinateur soit informé ou non de la réalisation d'une anesthésie diagnostique, illustrant le biais lié au contexte de l'évaluation.

Par ailleurs, Hewetson *et al.* (2006) ont mené une étude pour apprécier la fiabilité d'une échelle de gradation numérique et celle d'une échelle de gradation verbale dans l'évaluation des boiteries. 16 observateurs indépendants ont gradué la sévérité d'une boiterie sur 20 enregistrements vidéo de chevaux ; et la concordance intra et inter-individuelle, la corrélation et les biais ont été déterminés pour chaque échelle de gradation. La correspondance intra et inter-individuelle atteignait environ 50-60% pour les deux échelles, et il n'y avait pas de différence significative sur la moyenne des notations en utilisant l'une ou l'autre échelle. Ainsi, les résultats ont montré que la gradation numérique et la gradation verbale sont des outils seulement modérément fiables pour l'évaluation du grade de la boiterie, et qu'elles ne doivent pas être utilisées en alternance.

Bien que ces études soient critiquables sur leur conception (faible effectif, absence de chevaux sains, évaluation sur tapis roulant, évaluation sur vidéo,...), leur consensus suggère que l'évaluation clinique subjective par un individu ne doit pas être la seule référence lorsque les conclusions dépendent du grade de boiterie attribué (Keegan, 2007). Ainsi, le caractère subjectif de l'examen locomoteur du cheval est démontré. Les principales discordances sont toujours observées pour l'attribution du grade de boiterie, en particulier lorsqu'il faut graduer une évolution.

C. Intérêts d'une méthode objective d'évaluation de la locomotion équine.

1. Intérêts de la mesure quantitative de la boiterie en complément de l'examen clinique traditionnel

a. Utilisation sur le terrain des méthodes de mesures quantitatives

La méthode accélérométrique semble intéressante pour la mesure quantitative des boiteries sur le terrain. Le « Système Equimetrix » (Barrey et Desbrosse, 1996), présenté ultérieurement (II,C,2,c), permet de mesurer les irrégularités de la locomotion et de relier le degré d'asymétrie au degré de boiterie établi cliniquement. A la fois les boiteries d'appui et de soutien peuvent être détectées. Le principal avantage de cette technique ambulatoire est sa simplicité et sa rapidité d'utilisation. Les auteurs considèrent que le dispositif accélérométrique peut être utile en pratique vétérinaire pour quantifier le degré de la boiterie observée. Plusieurs voies d'application sont possibles : pour mesurer la progression d'une boiterie traitée et la récupération après chirurgie, et pour estimer le bon fonctionnement de l'appareil locomoteur lors de procédures d'évaluation telles que l'examen de visite d'achat ou le contrôle vétérinaire lors de compétitions (Barrey et Desbrosse, 1996).

b. Evaluation objective de l'évolution d'une pathologie et de l'efficacité d'un traitement

Lors de pathologie de l'appareil locomoteur, il est indispensable de suivre l'évolution des signes cliniques afin d'estimer l'efficacité d'un traitement. Lorsque le cheval est observé à plusieurs mois d'intervalle, parfois par un clinicien différent, la comparaison de l'examen clinique est difficile. Il semble donc intéressant d'avoir accès à une valeur chiffrée afin de pouvoir disposer d'une valeur de référence et suivre une évolution à long terme.

c. Evaluation objective des résultats des anesthésies diagnostiques

Le diagnostic des boiteries chez le cheval requiert d'identifier d'abord le(s) site(s) d'origine de la douleur responsable des troubles locomoteurs. Les anesthésies diagnostiques, comprenant les anesthésies régionales : anesthésies nerveuses tronculaires et les anesthésies plus focales : anesthésies synoviales, articulaires et tendineuses, représentent un moyen simple d'identification et permettent ainsi d'objectiver les boiteries. Dans un examen clinique complet, elles s'interposent généralement entre l'examen physique, statique et dynamique et la mise en œuvre des procédés d'imagerie médicale destinés à préciser la nature de la lésion (Denoix, 1995). Actuellement, la réalisation de ces anesthésies sémiologiques est bien codifiée. Leur fiabilité dépend de la technique employée pour leur réalisation et du protocole d'évaluation de leurs effets. L'évaluation du résultat d'une anesthésie doit se faire scrupuleusement dans les mêmes conditions que l'évaluation de la boiterie avant anesthésie, et il faut examiner le cheval dans les conditions qui fournissaient les anomalies locomotrices les plus caractéristiques au cours des cinq premières minutes qui suivent l'anesthésie (Denoix, 1992). L'examen sur tapis roulant peut faciliter l'évaluation de l'effet des anesthésies diagnostiques dans la mesure où le tapis roulant permet de régler la vitesse induisant

l'expression maximale des troubles et où cette vitesse ensuite peut être reproduite fidèlement (Denoix *et al.*, 2007). Néanmoins, lors de l'évaluation de l'efficacité d'une anesthésie, une amélioration partielle de la boiterie est couramment observée, qui est difficile à détecter subjectivement étant donné la faible amplitude du changement (Kramer *et al.*, 2000).

Lors de l'utilisation des anesthésies sémiologiques, il semblerait donc intéressant de combiner l'évolution clinique avant et après anesthésie à une mesure objective de cette évolution. En utilisant une méthode d'analyse de la locomotion, Kramer *et al.* (2000) ont par exemple déterminé les variables cinématiques les plus sensibles pour détecter une amélioration d'une boiterie postérieure, induite par une arthrite inter-tarsienne distale et tarso-métatarsienne, après anesthésie intra-articulaire (Kramer *et al.*, 2000). L'interprétation du résultat d'une anesthésie diagnostique est souvent délicate étant donné les faibles modifications à détecter et la part de subjectivité très importante ; c'est pourquoi l'accès à une mesure objective serait particulièrement intéressante. Cette mesure objective peut être la comparaison d'un indice de symétrie avant et après anesthésie.

d. Les visites d'achat et les expertises judiciaires

Dans le domaine équin, l'enjeu financier est souvent important et il peut amener parfois à des procédures judiciaires lors de mécontentement. Les visites d'achat sont par exemple des procédures délicates à gérer pour le vétérinaire. L'appareil locomoteur doit être évalué très scrupuleusement et méthodiquement, par un examen clinique standard et un examen radiographique.

Ainsi, face à l'enjeu judiciaire et économique, il apparaît intéressant de disposer d'un outil d'évaluation objectif de la locomotion du cheval.

e. Les expertises sur le terrain

Certaines disciplines équestres font appel aux vétérinaires pour remplir des rôles différents de celui de vétérinaire traitant, tels que « vétérinaire juge ». Par exemple, lors d'une épreuve d'endurance, les vétérinaires ont un rôle de juge majeur en contrôlant les critères responsables de l'élimination d'un concurrent et du classement final de l'épreuve. En effet, lors de différents contrôles, effectués avant, pendant et à l'arrivée de l'épreuve, un examen clinique de chaque cheval est effectué selon un protocole qui s'est progressivement normalisé et codifié. Les observations doivent être les plus rigoureuses possibles, et ce, dans un temps d'examen extrêmement court. Or, les boiteries sont le premier motif d'élimination en endurance. Une boiterie est éliminatoire si elle est observable de façon permanente sur un aller-retour de 40m en ligne droite au trot ; la boiterie doit être confirmée par au moins deux vétérinaires ; et il faut s'interdire de pratiquer au moment du contrôle tout examen supplémentaire visant à préciser un diagnostic, tels que changement de la nature du terrain, mise sur le cercle, test de flexion, etc.....

Ces expertises peuvent être l'objet de conflits, c'est pourquoi il semblerait intéressant de disposer d'un outil de mesure objectif en complément de l'évaluation clinique.

f. Evaluation objective de l'efficacité d'un médicament en vue de sa mise sur le marché

Dans le domaine de la pathologie locomotrice du cheval, de nombreux traitements arrivent sur le marché après réalisation d'études cliniques reposant uniquement sur l'évaluation subjective de la boiterie pour valider une amélioration clinique (Keegan, 2007). Cependant, la fiabilité lors de l'évaluation d'une boiterie modérée est faible (Keegan *et al.*, 1998). C'est pourquoi

une méthode objective et fiable de détection et de gradation des boiteries constituerait un outil très intéressant dans le cadre de la recherche pharmaceutique (Keegan *et al.*, 2004).

2. Etude de la locomotion d'un cheval à grande vitesse

Le cheval athlète est souvent présenté en consultation, non pas pour une gêne locomotrice évidente, mais souvent pour des défauts de performance ou des disqualifications, auxquels sont confrontés les professionnels. Le trouble locomoteur est alors très discret et un examen traditionnel en main ou en longe ne permet souvent pas de le mettre en évidence ; il ne se manifeste que dans les conditions de l'exercice sportif intensif : entraînement intense ou compétition (Denoix *et al.*, 2007). Peham *et al.* (1998) ont démontré que certaines asymétries locomotrices ne se manifestent qu'à grande vitesse : 12 chevaux /18 présentaient l'indicateur d'asymétrie cinématique le plus cohérent au trot à petite vitesse, tandis que pour 6 chevaux /18 la cohérence du tracé cinématique était plus élevée au trot à grande vitesse.

Il est donc indispensable d'examiner le cheval dans les conditions réelles d'apparition de ces perturbations, c'est-à-dire au trot à grande vitesse pour le trotteur de course, ce qui nécessite d'adapter les techniques d'examen. De plus, le cheval étant exposé à des situations de contraintes maximales, les anesthésies diagnostiques peuvent s'avérer dangereuses pour l'intégrité des formations anatomiques ostéo-articulaires ou musculo-tendineuses comme pour la bonne coordination des gestes rapides (Denoix *et al.*, 2007). Des recherches ont donc été entreprises pour développer de nouvelles techniques d'examen, reposant sur des méthodes objectives d'étude de la locomotion du cheval (Chateau *et al.*, 2007).

3. Intérêts de l'évaluation de la locomotion dans la prévision du potentiel sportif d'un jeune cheval

L'étude quantitative de la locomotion du cheval pourrait constituer un critère intéressant dans l'évaluation du potentiel sportif du cheval, dans un objectif de sélection génétique. En effet, la bonne corrélation de quelques paramètres cinématiques mesurés sur les poulains et les adultes rend possible la mesure de ces paramètres chez les jeunes chevaux dans le but de prédire la qualité de la locomotion du cheval adulte (Back *et al.*, 1994).

C'est pourquoi Barrey *et al.* (1994) ont cherché à décrire les qualités techniques des jeunes chevaux, dans les conditions de l'exercice sportif, pour prédire leur potentiel sportif. Ceci a été réalisé dans plusieurs disciplines : chevaux de sauts d'obstacles (Barrey et Galloux, 1997), trotteurs de course (Barrey *et al.*, 1995 ; Leleu *et al.*, 2002), et galopeurs (Barrey *et al.*, 2001).

4. Conclusion

L'étude quantitative de la locomotion du cheval présente donc de nombreuses applications dans des domaines très variés. Dans le cadre de la recherche, les applications sont déjà nombreuses en recherche fondamentale sur la locomotion du cheval et elles pourraient être étendues en recherche pharmaceutique, pour les études cliniques de mise sur le marché des médicaments. De plus, les méthodes quantitatives d'étude de la locomotion du cheval présentent aussi un grand intérêt pour une utilisation pratique sur le terrain, en apportant un outil supplémentaire objectif, fiable et répétable, au vétérinaire clinicien pour l'analyse des boiteries.

II. LES DIFFERENTES METHODES OBJECTIVES D'ETUDE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL

Dans cette partie, nous passerons en revue les différentes méthodes d'analyse objective existantes, en ciblant les techniques adaptables à une utilisation clinique.

A. Principe général des méthodes objectives d'analyse de la locomotion

Un modèle de squelette de cheval peut être défini comme un ensemble de segments articulés les uns aux autres. Le corps du cheval, comme tout corps animal ou humain, suit les mêmes lois mécaniques qu'une série d'objets inanimés. Deux méthodes complémentaires permettent l'étude d'un cheval en mouvement considérant que celui-ci, comme les autres organismes terrestres, suit les lois mécaniques Newtoniennes (Barrey, 1999 ; Siegel, 2001) :

- Les méthodes cinématiques :

Elles étudient les changements de position des différents segments du corps dans l'espace pendant un temps établi. Les mouvements sont décrits quantitativement à l'aide de variables linéaire et angulaire qui relient le temps, le déplacement, et la vitesse. En analyse cinématique, il n'y a pas de référence faite sur la cause du mouvement.

- Les méthodes cinétiques :

Elles étudient la cause du mouvement, qui peut être expliqué par la force appliquée au corps, sa distribution des masses et ses dimensions. La cinétique s'intéresse aux forces, aux accélérations, à l'énergie, et au travail, en relation avec les variables cinématiques telles que l'accélération et la vitesse.

Ainsi, la cinématique décrit le mouvement tandis que la cinétique explique le mouvement.

B. Les méthodes cinématiques

Les méthodes cinématiques permettent l'analyse des mouvements de chaque segment corporel. Elles constituent une approche descriptive de la locomotion équine (Siegel, 2001). Elles quantifient les caractéristiques de la locomotion équine qui sont évaluées qualitativement au cours de l'examen visuel. Les données cinématiques se présentent sous la forme de mesures temporelles, linéaires et angulaires, qui décrivent les mouvements des segments du corps et des angles articulaires (Clayton et Schamhardt, 2000).

1. Principe des systèmes d'analyse vidéo du mouvement

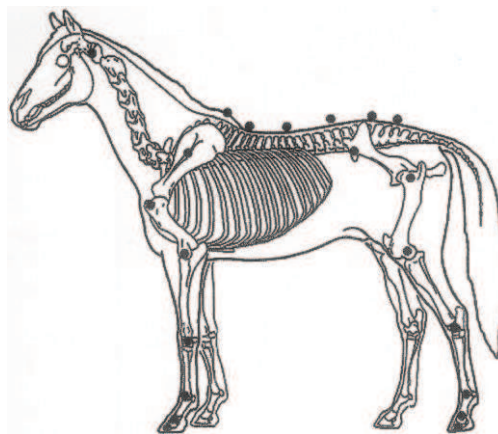
Les premières études cinématiques de la locomotion équine furent menées par Marey à la fin du XIX^{ème} siècle. Ce dernier utilisait la chronophotographie : les déplacements des segments du corps et des articulations sont mesurés sur les images successives prises à un intervalle de temps constant.

Puis les méthodes cinématiques ont évolué vers l'utilisation de la caméra et l'utilisation de marqueurs positionnés sur le sujet.

Les études cinématiques peuvent être bidimensionnelles (2-D) ou tridimensionnelle (3-D). Pour les études en 2-D, une seule caméra est utilisée ; par contre, l'analyse en 3-D implique d'utiliser au minimum 2 caméras et de s'assurer que chaque marqueur est visible par au moins 2 caméras tout au long du mouvement (Clayton et Schamhardt, 2000). Les études en 2-D sont plus simples à mettre en place, mais le sujet doit obligatoirement se déplacer sur une ligne droite, et les résultats peuvent être affectés par des distorsions d'images dues à des mouvements en dehors du plan. L'utilisation de la 3-D permet de surmonter ce problème, mais la procédure est plus complexe.

Les marqueurs sont circulaires (analyse en 2-D) ou sphériques (analyse en 3-D), faits par exemple de polystyrène recouvert d'une bande réfléchissante ou d'une peinture réfléchissante. Les marqueurs doivent être installés sur le cheval debout, au carré (en appui sur ses quatre membres). La localisation des marqueurs est établie en accord avec les objectifs de l'étude. L'étude peut porter sur l'ensemble du corps du cheval ou sur une localisation anatomique délimitée (une articulation). Les marqueurs peuvent être placés sur le tronc et sur les membres, depuis le sabot jusqu'à la région proximale (Figure 1). Le placement sur la ligne du dos permet d'évaluer la mobilité du tronc ; le placement sur la nuque, le garrot et la croupe permet d'évaluer la symétrie de la locomotion. Par ailleurs, pour analyser le comportement articulaire dans des modèles à plus de 1 ddl, il faut disposer de 3 marqueurs par segment osseux.

Figure 1 : Emplacements communément utilisés pour les marqueurs lors d'une analyse cinématique (Clayton et Schamhardt, 2000)



L'enregistrement des séquences doit se faire dans un espace délimité, correspondant au champ de vision des caméras. L'aire d'enregistrement doit être préalablement calibrée, afin de définir un repère et pouvoir ensuite calculer les coordonnées des marqueurs. Pour les systèmes vidéo classiques, les marqueurs sont éclairés pendant l'enregistrement, à environ 300-500W. La qualité de l'éclairage est importante pour bien repérer les marqueurs et faciliter la numérisation.

La numérisation, manuelle, semi-automatique ou automatique, est la première étape de traitement des données, qui récupère les coordonnées des marqueurs dans le temps et dans l'espace (Barrey, 1999). Pour les analyses en 3-D, la transformation permet de combiner les prises de vue en 2-D en une seule prise de vue en 3-D.

A partir des coordonnées des marqueurs, les vitesses linéaire et angulaire peuvent être obtenues en dérivant les mesures de trajectoire et d'angulation par rapport au temps. De même, la dérivée seconde permet d'obtenir les accélérations linéaire et angulaire. Ainsi sont obtenus pour chaque segment étudié différents paramètres cinématiques : déplacement, vitesse et accélération linéaires, angle de rotation, vitesse et accélération angulaires. Ces paramètres décrivent la longueur de la foulée, les distances de placement entre les membres, les trajectoires aériennes des différentes parties du corps...

La normalisation des données facilite la comparaison entre différents chevaux, par standardisation de certains paramètres. La normalisation à la durée de la foulée exprime les valeurs des variables temporelles sous forme de pourcentage de durée de la foulée. Cela permet la construction d'une courbe moyenne, regroupant un certain nombre de foulées.

Les systèmes optoélectroniques sont des systèmes d'analyse vidéo du mouvement plus sophistiqués, utilisant soit des marqueurs actifs (marqueurs qui émettent un signal) soit des marqueurs passifs (marqueurs qui détectent ou reflètent un signal). Les avantages sont la bonne résolution en 3-D, la haute fréquence d'acquisition (300 Hz), et la numérisation instantanée, qui rend les données utilisables rapidement (Barrey, 1999). Néanmoins, l'utilisation de ces systèmes est généralement limitée au laboratoire, du fait de la nécessité d'une connexion de câbles électriques au sujet et de conditions d'éclairage très contrôlées (Clayton et Schamhardt, 2000).

2. Conditions d'utilisation des Systèmes d'Analyse Vidéo du Mouvement

a. Piste expérimentale de mesure

Dans les conditions de laboratoire, les chercheurs étudient la locomotion du cheval se déplaçant sur une piste expérimentale. Pour une analyse cinématique, la piste mesure quelques dizaines de mètres, et des caméras vidéo l'encadrent de façon à permettre une reconstitution en 3-D du déplacement du cheval. La piste d'examen est donc restreinte au champ de vision des caméras, ce qui ne permet l'enregistrement que d'un nombre limité de foulées. Pour enregistrer un plus grand nombre de foulées consécutives, le tapis roulant constitue une alternative.

b. Le tapis roulant à grande vitesse

Le tapis roulant à grande vitesse est un outil intéressant et de plus en plus répandu en médecine vétérinaire équine. En pratique, cet outil est utilisé à la fois en médecine sportive (pathologies cardio-respiratoires) et en pathologie locomotrice. Dans le domaine de la recherche portant sur l'analyse de la locomotion équine, le tapis roulant constitue un outil fondamental, très souvent utilisé, soit pour une analyse cinématique, soit pour une analyse cinétique.

Dans le cadre d'une analyse cinématique, le tapis roulant présente l'avantage considérable de diminuer nettement la taille de la piste expérimentale de mesures, tout en permettant un enregistrement continu sur un nombre de foulées illimité. Les caméras sont facilement mises en place autour du tapis, dans un endroit protégé. De plus, le tapis roulant est un excellent moyen de contrôler la régularité de la locomotion, car la vitesse et la pente du tapis sont fixées par l'opérateur. Enfin, le tapis roulant permet d'évaluer la locomotion du cheval à grande vitesse, ce qui ne peut pas être réalisé lors de l'examen dynamique standard. Le tapis roulant

permet donc de réaliser des examens avec du matériel sophistiqué et dans des conditions standardisées.

Ainsi, de nombreuses études ont été effectuées sur des tapis roulant. Mais, cela éloigne des conditions réelles d'entraînement, et des différences ont été reportées entre la locomotion sur tapis roulant et la locomotion sur sol ferme, à la fois chez l'homme et chez le cheval. Une étude a été menée pour comparer la locomotion du cheval au trot, évoluant sur le sol ferme ou sur tapis roulant (Buchner *et al.*, 1994a). Afin d'éviter de mêler divers facteurs, l'influence de la surface du sol sur la locomotion a été analysée séparément (asphalte vs sol synthétique), puis la locomotion sur tapis roulant et la locomotion sur sol ferme ont été comparées. Les résultats de cette étude montrent que de nombreuses variables cinématiques sont significativement modifiées, le cheval se déplaçant sur sol ferme ou sur tapis roulant. Sur le tapis roulant, au trot, lors de la phase d'appui d'un diagonal, l'impact des antérieurs précède celui des postérieurs, l'ordre étant inversé sur sol ferme. Sur le tapis roulant, la phase d'appui est prolongée par rapport à la phase de soutien, avec en particulier un prolongement de la rétraction et un déplacement vers l'arrière des membres. De plus, le déplacement vertical des pieds et du tronc est réduit : les allures sont plus rasantes et le cheval mobilise moins son dos. Par contre, la locomotion est nettement plus régulière sur tapis roulant (Buchner *et al.*, 1994a). Des résultats comparables ont été relatés dans d'autres études. Pour des chevaux évoluant au trot à la même vitesse, la vitesse est atteinte sur tapis roulant avec une longueur de la foulée plus élevée que sur sol ferme (Barrey *et al.*, 1993). Sur tapis roulant, les chevaux montrent une fréquence de foulée réduite, et une longueur de foulée et une régularité de la locomotion augmentées. De plus, la fréquence cardiaque et la concentration en lactates sont plus faibles (Couroucé *et al.*, 1999). Pfau *et al.* (2005) constatent également une réduction des déplacements verticaux du tronc et une augmentation de la longueur de la foulée sur tapis roulant. Différents facteurs interviennent, tels que des facteurs physiologiques, biomécaniques et les conditions atmosphériques (Couroucé *et al.*, 1999). Ces différences sont à prendre en compte, et doivent être gardées en mémoire lorsque des données obtenues sur tapis roulant sont extrapolées aux conditions de terrain.

Par ailleurs, pour analyser la locomotion du cheval sans stress, de façon à limiter au maximum les interférences, des sessions préalables sont indispensables pour le familiariser à cet exercice inhabituel (Buchner *et al.*, 1994b). Le cheval s'adapte rapidement au trot, et on estime que les mesures peuvent commencer lors de la troisième session. Pour le pas, de nombreux paramètres de la foulée ne sont pas stabilisés avant au moins la neuvième session. Au cours d'une session, un minimum de 5 minutes de pas ou de trot est nécessaire pour obtenir une allure régulière.

Le tapis roulant offre de nombreuses possibilités d'évaluation de la locomotion du cheval ; néanmoins, cet outil ne peut remplacer les conditions de terrain dans lesquelles le cheval évolue au cours de l'exercice sportif.

c. Caméras à haute fréquence et utilisation sur le terrain

Les caméras à haute fréquence, enregistrant 500 images/s ou plus, ont souvent été utilisées chez les trotteurs pour analyser la locomotion à grande vitesse sur piste.

La caméra à haute fréquence peut être placée dans une voiture qui suit parallèlement le déplacement du cheval sur la piste (Fredricson, 1980). Une analyse cinématique 2-D utilisant cette technique a été entreprise pour décrire la locomotion du trotteur à grande vitesse sur piste : description de la foulée et étude des variations intra- et inter-chevaux (Drevemo *et al.*, 1980a), étude de la coordination des membres et de la symétrie de l'allure (Drevemo *et al.*, 1980b), et étude de la reproductibilité du trot à court terme et à long terme (Drevemo *et al.*,

1980c). Cette méthode présente l'avantage d'enregistrer un grand nombre de foulées successives.

La caméra à haute fréquence peut également être fixée au sol ; l'optimisation du champ de vision peut être obtenu en utilisant deux caméras parallèles, ou en utilisant une seule caméra panoramique montée sur un trépied (Drevemo et Johnston, 1994). Une méthode cinématique 2-D utilisant une caméra panoramique permet d'étudier la locomotion du trotteur à grande vitesse. La caméra est fixée perpendiculairement au centre de la piste d'enregistrement, à 40m de distance. Le procédé de transformation permet de récupérer les coordonnées des marqueurs, en se référant à des marqueurs fixés au sol, espacés à intervalles réguliers. Au moins 2 marqueurs au sol doivent être visibles sur chaque image du film. L'angle de rotation de la caméra entre chaque image est calculé en fonction de la distance séparant les marqueurs au sol. Cette méthode permet d'enregistrer 6 foulées successives. Les limites de l'enregistrement 2-D sont en partie contrecarrées par l'éloignement à grande distance de la caméra par rapport au cheval. Les résultats obtenus montrent que les erreurs de mesures sont faibles et que la méthode est convenable pour étudier la locomotion du cheval sur le terrain (Drevemo et Johnston, 1994). Par rapport à l'utilisation d'une caméra haute fréquence embarquée dans une voiture, cette méthode présente l'inconvénient principal de ne pouvoir enregistrer qu'un nombre restreint de foulées successives. L'utilisation d'une caméra panoramique dans une analyse cinématique 2-D a été effectuée aussi chez les chevaux de sauts d'obstacle, dans le but de décrire la technique de saut (Galloux et Barrey, 1997).

En conclusion, les analyses cinématiques à grande vitesse apportent des informations de grande qualité ; néanmoins, elles nécessitent beaucoup de temps et de matériel et ne peuvent donc pas être utilisées en routine sur le terrain (Leleu *et al.*, 2002).

3. Traitement des données cinématiques pour analyser la symétrie de la locomotion du cheval

Les études cinématiques peuvent être entreprises afin d'étudier la symétrie de la locomotion du cheval et de quantifier les boiteries. Dans ce cas, l'analyse porte sur les mouvements asymétriques de la tête et du tronc. Les données cinématiques fournissent des informations concernant le déplacement des différents marqueurs du tronc en fonction du temps. L'analyse du déplacement doit ensuite permettre d'apprécier la symétrie des mouvements. Plusieurs méthodes ont été développées dans cet objectif. Audigié *et al.* (2002) ont par exemple étudié l'application de l'analyse de Fourier aux déplacements du tronc d'un cheval au trot afin de quantifier le degré de boiterie, identifier le membre boiteux et caractériser les mouvements de déplacements du tronc. Par un système d'analyse cinématique en 3D, 13 chevaux sains et 25 chevaux boiteux ont été filmés au trot en ligne droite, dans les conditions de l'examen dynamique standard. Chaque cheval porte 4 marqueurs sur la ligne médiane du tronc, en regard du garrot (T6), de T13, de L1 et de la jonction lombosacrée (LS).

a. Analyse de Fourier et Indice de Symétrie Global (Audigié *et al.*, 2002)

Le déplacement vertical des marqueurs se présente sous la forme d'une sinusoïde, comportant deux ondulations par foulée, à laquelle la décomposition en série de Fourier peut être appliquée. Un calcul des deux premières harmoniques de la série de Fourier permet de déterminer un indice de symétrie global (Audigié *et al.*, 2002).

Pour chaque intervalle d'étude, l'analyse de Fourier est appliquée. Le déplacement vertical du dos en regard de chacun des marqueurs peut être exprimé en fonction du temps :

$$Z_F(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=2} A_i \cos\left(i \frac{2\pi}{T} t + \phi_i\right)$$

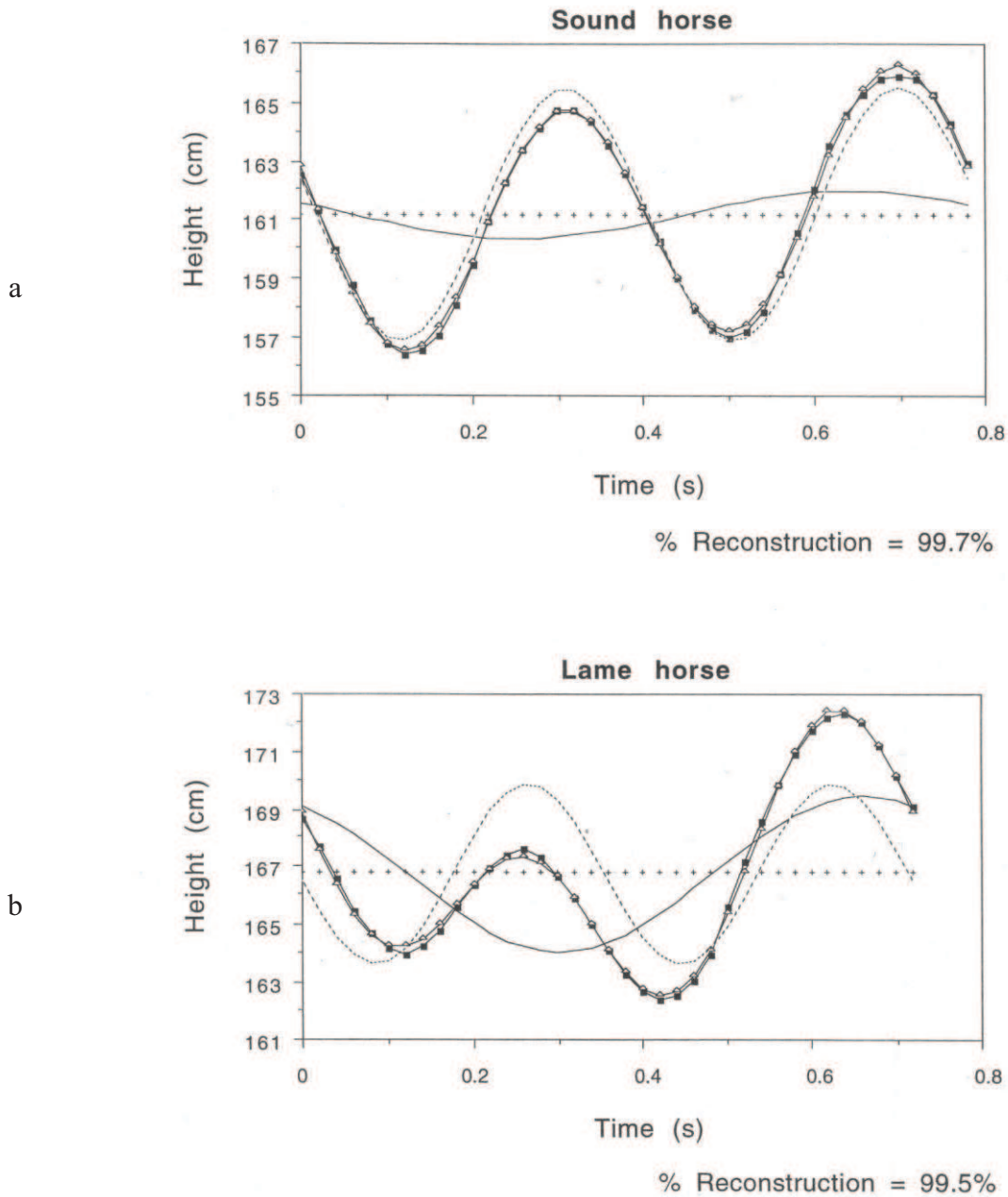
A_0 est la valeur moyenne du déplacement sur la période correspondant à une foulée (T)
 A_i et ϕ_i sont l'amplitude et la « phase » de l'harmonique i , respectivement.

Le déplacement vertical du dos peut être représenté seulement à l'aide de la première et de la seconde harmonique. Ceci a été vérifié en calculant le ratio correspondant au pourcentage de reconstruction du déplacement expérimental à partir du déplacement moyen et des deux premières harmoniques :

$$\% \text{ Reconstruction} = \left(1 - \frac{\sum_{\text{Frame } t=0}^{\text{Frame } t=T} (Z_{exp} - Z_F)^2}{\sum_{\text{Frame } t=0}^{\text{Frame } t=T} (Z_{exp} - A_0)^2} \right) \times 100$$

Ces deux harmoniques permettent de reconstruire au moins 95% du déplacement avec une précision $\geq 99\%$ (Audigié *et al.*, 2002). Sur le cheval au trot, le déplacement vertical du marqueur montre deux ondulations par foulée, une oscillation par appui de chaque diagonal (Figure 2). La 2^{ème} harmonique, constituée des éléments similaires de chaque oscillation verticale, représente la part symétrique du déplacement (se produisant 2 fois au sein d'une foulée). La 1^{ère} harmonique, constituée des éléments différents de chaque oscillation verticale représente la part asymétrique du déplacement. C'est pourquoi, la période de la 2^{ème} harmonique est le double de celle de la 1^{ère}. Ainsi, la 2^{ème} harmonique, représentant la part symétrique du déplacement, est considérée comme l'harmonique intrinsèque ; et la 1^{ère} harmonique, représentant la part asymétrique du déplacement, est considérée comme l'harmonique extrinsèque. Sur la figure 2, on peut observer les différences d'allures des harmoniques entre un cheval présentant une locomotion symétrique (a) et un cheval présentant une boiterie (b).

Figure 2 : Analyse de Fourier appliquée au déplacement vertical d'un marqueur de la ligne du dos sur une foulée de trot (Audigié *et al.*, 2002)



- Courbe en carrés noirs : déplacement vertical expérimental
- Courbe en croix : A_0 : valeur moyenne du déplacement
- Courbe continue : 1^{ère} harmonique
- Courbe discontinue : 2^{ème} harmonique
- Courbe en triangles : reconstruction à partir d' A_0 et des 2 harmoniques.

On remarque clairement le rôle de la 1^{ère} harmonique qui représente l'asymétrie, au contraire de la 2^{ème} harmonique qui elle représente 2 demi-foulées parfaitement identiques. Ainsi, pour une foulée symétrique (Figure 2a), la 1^{ère} harmonique est de faible amplitude.

La symétrie de la locomotion peut être quantifiée en calculant un ratio d'énergie (ER_Z), qui correspond au pourcentage que représente la 2^{ème} harmonique dans l'amplitude globale du mouvement. Ce ratio est calculé selon la formule suivante :

$$ER_Z = \frac{A_2^2}{A_1^2 + A_2^2} \times 100$$

Les valeurs de ce ratio sont comprises entre 0% et +100% ; la valeur de +100% correspondant à une symétrie parfaite.

Ce ratio est très similaire à celui proposé par Peham *et al.* (1996), à l'exception près que le ratio ER_Z compare l'énergie des harmoniques plutôt que leurs amplitudes, ce dernier semblant moins discriminatif (Audigié *et al.*, 2002).

b. Analyse de Fourier et identification du membre boiteux (Audigié *et al.*, 2002)

Sur les chevaux boiteux, l'un des rôles des mouvements asymétriques du tronc est de réduire la charge du membre boiteux lors de sa phase d'appui (Buchner *et al.*, 1996). Ainsi, l'analyse de l'allure de la courbe de déplacement du tronc en fonction du temps devrait permettre d'identifier le membre boiteux.

Dans un premier temps, l'analyse doit permettre de distinguer une boiterie antérieure d'une boiterie postérieure.

En suivant l'hypothèse que la symétrie des mouvements du tronc serait plus modifiée en région crâniale du tronc lors de boiterie antérieure et en région caudale lors de boiterie postérieure, le schéma décisionnel binaire suivant a été déterminé (Audigié *et al.*, 2002):

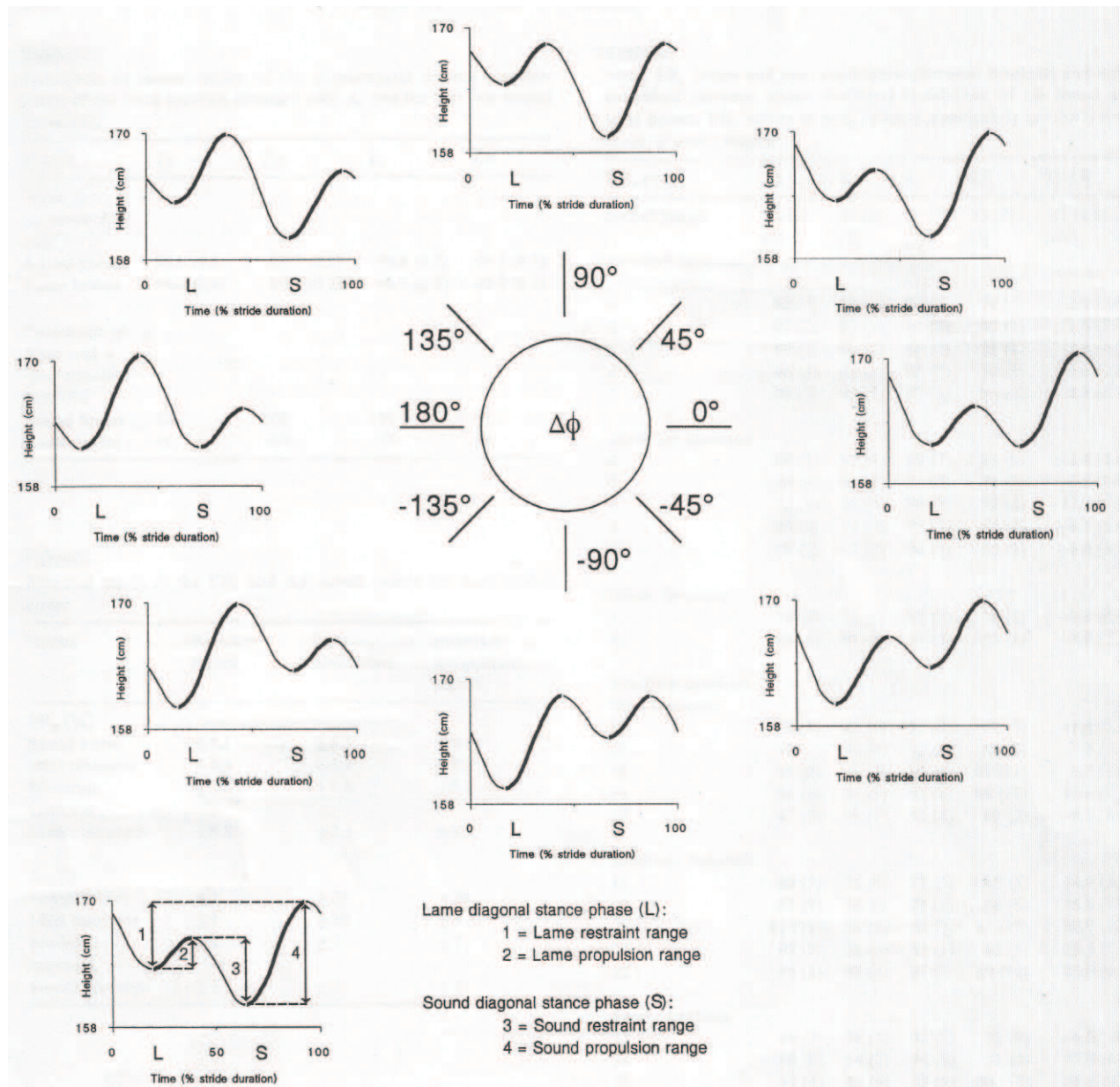
$$\begin{aligned} \text{Si } T6-LS < (T6-LS)_{\text{chevaux sains}} &\rightarrow \text{boiterie antérieure} \\ \text{Si } T6-LS > (T6-LS)_{\text{chevaux sains}} &\rightarrow \text{boiterie postérieure} \end{aligned}$$

Dans un second temps, l'analyse doit permettre de latéraliser la boiterie.

Le déplacement du tronc en fonction du temps peut être caractérisé par les valeurs de déphasage des harmoniques (ϕ_j). Ces valeurs permettent de calculer le paramètre $\Delta\phi$, qui, variant de -180° à $+180^\circ$, peut être rattaché aux différents schémas descriptifs du déplacement du tronc (Figure 3) :

$$\Delta\phi = \frac{\phi_2}{2} - \phi_1$$

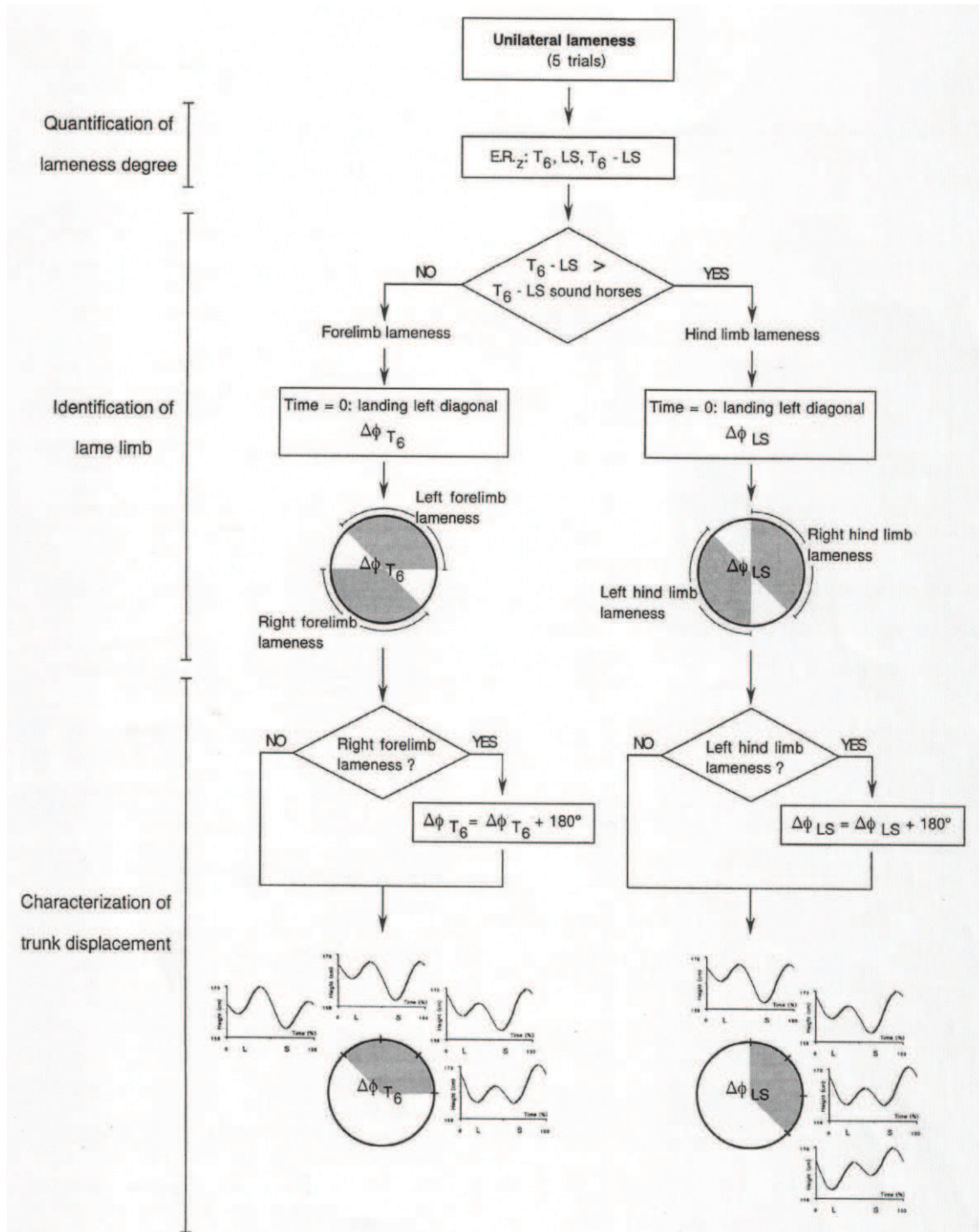
Figure 3 : Relation entre $\Delta\theta$ et les différents schémas descriptifs du déplacement du tronc (Audigié *et al.*, 2002)



En prenant comme critère que l'amplitude de propulsion du membre boiteux est inférieure à celle du membre sain (Buchner *et al.*, 1996), cela permet de définir l'intervalle des valeurs de $\Delta\theta$ correspondant à l'identification du membre boiteux (-45° ; $+135^\circ$).

Ainsi, les auteurs ont construit un algorithme décisionnel permettant l'identification du membre boiteux (Figure 4).

Figure 4 : Algorithme permettant de quantifier le degré de boiterie, identifier le membre boiteux et caractériser les mouvements de déplacements du tronc, chez un cheval au trot (Audigié *et al.*, 2002)



Cet algorithme a permis d'identifier le membre boiteux chez 24 chevaux /25 (Audigié *et al.*, 2002).

4. Conclusion

Les méthodes cinématiques fournissant tous les paramètres relatifs aux déplacements des différents segments. Elles permettent, dans le cadre de l'analyse des boiteries, une description précise et quantitative des signes cliniques, et participent ainsi à l'amélioration des connaissances sur les différents types de boiterie et la façon dont les chevaux gèrent les douleurs locomotrices. Elles fournissent de nombreux paramètres descriptifs de la mobilité des articulations, tels que les variations de l'angulation au cours de la foulée (Pourcelot *et al.*, 1997). En revanche, un inconvénient majeur est constitué par la limitation du champ d'enregistrement permis par cette méthode, limité à quelques mètres (Siegel, 2001). Cette méthode ne peut être appliquée que sur un nombre limité de foulées. Or, l'analyse d'un grand nombre de foulées permettrait une meilleure représentativité des mouvements du cheval, ce qui est particulièrement important pour évaluer des boiteries discrètes ou intermittentes, ou juger d'une amélioration partielle après une anesthésie diagnostique ou un traitement (Kramer *et al.*, 2004). Par ailleurs, le coût élevé qu'elles engendrent, et la maintenance technique qu'elles nécessitent, limitent les applications de ce type de système à un environnement de laboratoire (Pourcelot *et al.*, 1997 ; Barrey, 1999).

C. Les méthodes cinétiques

Les premières analyses cinétiques ou dynamiques sont également très anciennes. Marey réalisa à la fin du XIX^{ème} siècle les premières mesures expérimentales sur la locomotion équine. Il utilisait un capteur de pression attaché au fer sous le sabot et des capteurs pneumatiques attachés aux membres pour calculer la durée du contact entre le sabot et le sol aux différentes allures (Figure 5 ; Siegel, 2001). Les méthodes ont depuis évolué grâce aux avancées technologiques du XX^{ème} siècle, mais les principes en sont restés proches (Barrey, 1999).

Figure 5 : Premières études expérimentales de la locomotion équine par Marey en 1887 (Barrey, 1999)



(a) : Cheval équipé avec des capteurs pneumatiques attachés sur les membres, la selle et le tuber sacrale pour mesurer les paramètres temporels de la locomotion

(b) : Mesures des changements de pressions au cours du temps, à partir des capteurs pneumatiques, lorsque le cheval est au trot.

Les analyses cinétiques mesurent les forces locomotrices appliquées au corps, à la fois externes et internes. Les forces exercées par les muscles sont transformées en forces de rotation des segments des membres qui au final produisent le mouvement. Au cours de la locomotion, les forces de réaction du sol (Ground Reaction Force = GRF) peuvent être enregistrées à l'aide de plate-formes de force ou de fers dynamométriques. Les forces transmises et les accélérations à travers le corps sont enregistrées à l'aide d'accéléromètres attachés directement aux tissus.

1. Enregistrement des forces de réaction du sol

Les forces externes sont mesurées en utilisant des capteurs de force électroniques, qui peuvent être installés soit sur le sol par le procédé des plates-formes de force, soit sous le sabot dans un fer dynamométrique (Siegel, 2001).

a. Les plates-formes de force

Les plates-formes de force incorporées au sol sont utilisées pour mesurer les forces de réaction du sol. Lorsque le cheval marche sur la plate-forme, la force est détectée par des jauges de contrainte ou des transducteurs, présents aux coins de la plate-forme, et elle est convertie par un signal électrique qui est amplifié et enregistré. Les variables obtenues sont la durée de l'appui, l'amplitude et l'orientation de la force (coordonnées des vecteurs en trois dimensions, selon l'axe vertical, l'axe longitudinal et l'axe transversal), les coordonnées de son point d'application et la valeur du moment en ce point (Clayton et Schamhardt, 2000). Les durées des phases d'appui, les amplitudes des GRF et les impulsions sont symétriques pour des chevaux sains, au pas et au trot. L'évaluation d'une variété de boiteries a montré un schéma similaire de modifications des GRF lors de boiteries : une réduction de la force de décélération horizontale, une réduction de l'amplitude de la force verticale et de l'impulsion sur le membre boiteux, avec des modifications compensatoires sur le membre controlatéral (Clayton et Schamhardt, 2000).

La méthode étant sensible et précise, les plates-formes de force ont été utilisées avec succès pour caractériser des boiteries d'appui principalement (tendinite du tendon fléchisseur superficiel du doigt, lésions articulaires distales), pour détecter des boiteries, pour mesurer la réponse d'un cheval boiteux à une anesthésie diagnostique ou à un traitement et pour détecter des anomalies de postures chez des chevaux atteints de maladies neurologiques (Barrey, 1999 ; Clayton et Schamhardt, 2000).

Néanmoins, les plates-formes de forces présentent de nombreuses limites d'utilisation : la surface sensible est relativement petite (environ 0,5m²) et un contrôle visuel de la localisation du point de contact entre le sol et le sabot est indispensable (Barrey, 1999). Des problèmes surviennent régulièrement lorsque le cheval refuse de marcher sur la plate-forme, lorsqu'il prend appui sur la bordure ou lorsque plus d'un sabot est en appui sur la plate-forme simultanément, étant donné qu'il est alors impossible de séparer leurs effets, ce qui rend la mesure inexploitable (Clayton et Schamhardt, 2000). Enfin, la limite principale réside dans l'impossibilité d'évaluer une foulée complète, les plates-formes de force réalisant des mesures sur un seul membre à la fois.

b. Les fers instrumentés

Pour mesurer les forces de réaction du sol au cours de l'exercice, plusieurs auteurs ont développé différents types de fers dynamométriques, incluant un ou plusieurs capteurs de force. Les fers de forces sont attachés directement sur le sabot et permettent la mesure des GRF au cours d'un grand nombre de phases d'appui successives, ce qui représente un avantage par rapport aux plates-formes de force. De plus, ils peuvent collecter des données sur plus d'un membre à la fois et permettent une analyse de la locomotion dans de nombreuses circonstances d'exercice pouvant être utilisés sur différents types de surface (Clayton et Schamhardt, 2000).

Par contre, ils représentent le désavantage majeur de leur épaisseur et du surpoids qu'ils entraînent (Barrey, 1999). Plusieurs chercheurs ont utilisé les fers de force expérimentalement, mais aucun n'est commercialisé ; bien qu'ils constituent une méthode idéale de mesures des GRF, les difficultés techniques pour construire un système exact et fiable limitent leur utilisation à des applications en recherche (Clayton et Schamhardt, 2000).

c. Les tapis roulants instrumentés

Comme on l'a vu précédemment, les limites principales d'utilisation des plates-formes de force sont le contrôle visuel du point de contact entre le sol et le sabot, difficile à réaliser, et la possibilité de réaliser des mesures que sur 1 seul membre. Une amélioration majeure a été proposée par Weishaupt *et al.* (2002) qui ont développé une technique innovante et performante : une plate-forme de force placée sous la surface d'un tapis roulant. Ce dispositif sophistiqué, dénommé « Treadmill-integrated force measuring system » (TiF), mesure simultanément les forces de réaction du sol des quatre membres ainsi que leur point d'application. Les tests de validation de ce dispositif montraient une bonne corrélation entre les forces calculées grâce au TiF ou grâce à des fers de force ($r > 0,0998$) ; même si les valeurs moyennes des différentes variables différaient significativement entre les deux méthodes ; et les auteurs considéraient qu'une différence de 2 à 5% était acceptable (Weishaupt *et al.*, 2002). Ainsi, les tapis roulant instrumentés permettent une mesure en continu et sur un nombre de foulées illimité des forces verticales des quatre membres. Une première base de données a été établie pour les chevaux se déplaçant au petit trot (3.5 ± 0.05 m/s) (Weishaupt *et al.*, 2004a). Les inconvénients majeurs de cette méthode sont l'accessibilité et le coût élevé de l'équipement, auxquels s'ajoutent les inconvénients liés au tapis roulant, déjà évoqués.

2. Utilisation de l'accélérométrie.

a. Principe

Les études biomécaniques utilisent traditionnellement les systèmes d'analyse cinématique du mouvement pour déterminer la position d'un objet dans un repère établi dans un espace délimité bien défini. Cela restreint les expériences à ce volume calibré. Ce système n'est pas idéal pour de nombreuses études sur la locomotion, puisque, d'une part, seulement quelques foulées peuvent être enregistrées à chaque test, et d'autre part, les applications sur le terrain sont difficiles. Bien que les tapis roulants soient souvent utilisés pour solutionner ce problème, ils ne sont pas idéaux et utilisables en toutes circonstances (Pfau *et al.*, 2005). Ainsi, des méthodes ambulatoires ont été conçues et appliquées à l'analyse de la locomotion du cheval.

La mesure des accélérations du corps est permise par l'utilisation de petits capteurs, les accéléromètres, qui peuvent être fixés solidement sur le segment à étudier. L'accéléromètre mesure les changements instantanés de la vitesse du corps au cours d'un intervalle de temps donné, ce qui correspond à l'accélération appliquée au corps. Le vecteur accélération est proportionnel à la force appliquée au corps à l'endroit où le capteur y est attaché (Siegel, 2001). Le signal d'accélération peut être traité par différentes procédures d'analyse pour extraire les variables temporelles et dynamiques de la foulée. Par ailleurs, en calculant la double intégrale de l'accélération linéaire, le déplacement linéaire instantané peut être estimé.

L'avantage principal de la méthode accélérométrique est la simplicité de la technique qui permet l'étude de la cinétique du cheval dans différentes conditions à la fois expérimentale et de terrain. En revanche, la limite principale est que les variables calculées ne concernent que le site de placement du capteur, et non pas chaque segment du corps (Barrey, 1999).

b. Méthode accélérométrique permettant une analyse descriptive de la locomotion équine

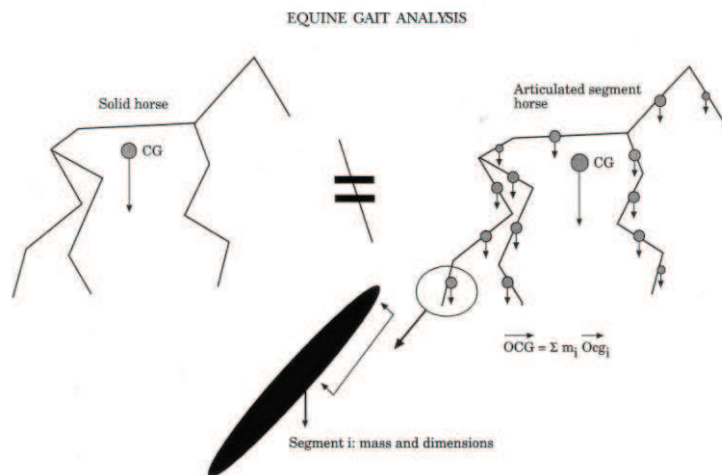
(1) Présentation du « système Equimetrix » (Barrey *et al.*, 1994)

En 1994, Barrey et al ont mis en place un système accélérométrique permettant d'analyser quantitativement la locomotion équine. L'objectif étant de mesurer l'accélération globale du cheval, l'accéléromètre doit être placé le plus proche possible du centre de gravité du corps. Le principe découle de lois mécaniques simples qui concernent le vecteur accélération : l'accélération d'un point peut être rapportée à la somme des forces s'y exerçant par un coefficient de proportionnalité égal à l'inverse de la masse (Figure 6) :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Un squelette de cheval peut être modélisé par un groupe de segments articulés les uns aux autres. Le corps du cheval suit donc les mêmes lois mécaniques qu'une série d'objets inanimés. Une approximation consiste à appliquer les lois mécaniques au centre de gravité du cheval. La position du centre de gravité global du cheval peut être calculé en considérant la masse et les coordonnées du centre de chaque segment (Barrey, 1999).

Figure 6 : Un modèle mécanique du cheval, composé des segments du corps articulés les uns aux autres (CG = Centre de Gravité) (Barrey, 1999)

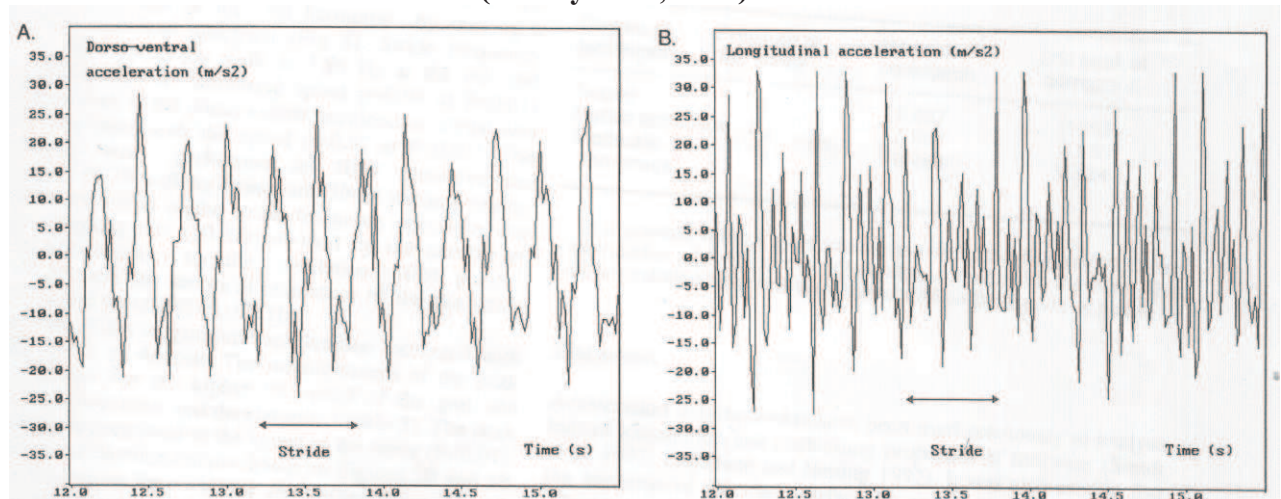


Ainsi, les auteurs choisissent de placer le dispositif accélérométrique sur le sternum. Le dispositif est constitué de deux accéléromètres mesurant l'accélération le long des axes longitudinal et dorsoventral des chevaux. Ils sont appliqués contre le sternum au moyen d'une sangle élastique attachée au cheval, contenant une petite poche dans laquelle sont glissés les accéléromètres. Cette ceinture accélérométrique est connectée à un système radio télémétrique de faible poids ; le signal est transmis à un receveur connecté à un microordinateur portable. Ce dispositif accélérométrique peut être utilisé soit sur tapis roulant soit dans les conditions de terrain (Barrey *et al.*, 1994).

(2) Les procédures de traitement des données accélérométriques

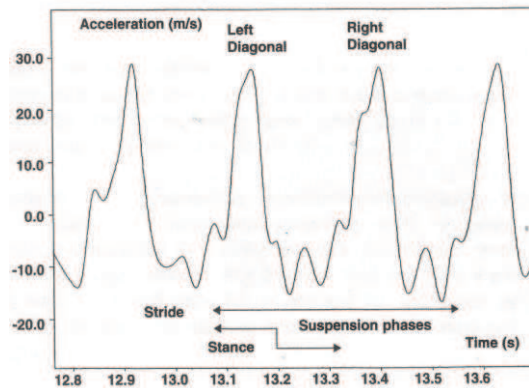
Les accélérations longitudinale et dorsoventrale du sternum (Figure 7) fournissent des informations quantitatives sur la cinétique et la cinématique temporelle de la foulée du cheval en mouvement.

Figure 7 : Courbes d'accélérations longitudinale et dorsoventrale d'un cheval au trot (Barrey *et al.*, 1994)



Les mesures des accélérations dorsoventrale et longitudinale ont été rattachées avec précision aux mouvements cycliques des membres. La correspondance entre la forme de la courbe et les différentes phases du cycle d'une foulée a été établie, au pas et au trot sur tapis roulant, en filmant à l'aide d'une caméra synchronisée. L'association d'enregistrements accélérométrique et cinématographique a donc permis d'identifier la signification des différents pics d'accélération successifs. Cette correspondance est montrée sur la figure 8 (Barrey, 1995). Il permet de rechercher les changements, vitesse-dépendants, de la fréquence de la foulée et de l'accélération longitudinale.

Figure 8 : Correspondance entre le tracé de l'accélération dorsoventrale, obtenue lors d'une foulée de trot, et les différentes phases de la foulée (Barrey *et al.*, 1995)



D'après Barrey *et al.* (1994), l'accélération longitudinale est moins répétitive que l'accélération dorsoventrale, du fait des changements brutaux des signes de l'accélération (accélération/décélération) associés au travail de propulsion à chaque cycle. C'est pourquoi les différentes fonctions d'analyse sont appliquées à l'accélération dorsoventrale.

(a) Calcul de la fréquence de la foulée

Toutes les allures, à vitesse constante, peuvent être considérées comme la somme de mouvements périodiques stationnaires. Ceci permet d'appliquer l'analyse de Fourier aux signaux accélérométriques. Les principales harmoniques du mouvement peuvent être extraites à partir du spectre de la transformée rapide de Fourier (Fast Fourier Transform = FFT) qui exprime le carré de l'amplitude de l'accélération (en $(m.s^{-2})^2$) en fonction de la fréquence (en Hz). Cette procédure a donc été appliquée à l'accélération dorsoventrale enregistrée au pas et au trot. Dans ce cas, la première harmonique correspond au mouvement périodique d'une demi-foulée. La fréquence de la foulée est déduite en divisant la fréquence de la première harmonique par deux.

(b) Calcul de l'amplitude de l'accélération longitudinale

Les pics des accélérations et des décélérations sont repérés à l'aide d'une fonction de recherche des maximums et minimums du programme de traitement de données, puis, une valeur moyenne des pics est calculée.

Ainsi, dans cette première étude, Barrey *et al.* (1994) concluent sur le fait que l'accélérométrie permet une étude objective de quelques caractéristiques de base de la locomotion du cheval, dans des conditions de terrain.

c. Méthode accélérométrique appliquée à la quantification des boiteries chez le cheval

La méthode accélérométrique permet également de quantifier la symétrie de la locomotion du cheval. Il existe différentes procédures mathématiques permettant d'évaluer la symétrie de la locomotion.

(1) Evaluation de la symétrie à partir du tracé accélérométrique (Barrey et Desbrosse, 1996)

Dans la première étude présentant l'utilisation du « Système Equimetrix », les auteurs constatent que ce système permet de détecter des boiteries modérées (Barrey *et al.*, 1994). Puis, le programme de traitement des données a été enrichi pour améliorer la quantification des boiteries (Barrey et Desbrosse, 1996).

Le principe de base d'interprétation d'un tracé accélérométrique repose sur le constat que lorsqu'une douleur est présente sur un membre, le cheval a tendance à soulager ce membre, ce qui se traduit par un appui asymétrique et donc des modifications des accélérations dorsoventrale et latéromédiale. Lorsque le cheval se déplace à une allure régulière (le trot), le signal de l'accélération dorsoventrale présente un profil périodique régulier. La symétrie du mouvement peut être appréciée en comparant les demi-foulées successives sur le signal (Barrey *et al.*, 1994). Il existe différentes procédures mathématiques permettant d'effectuer cette comparaison.

(a) La fonction d'autocorrélation

La symétrie de la locomotion au pas et au trot peut être quantifiée en appliquant la fonction d'autocorrélation au signal. Cette procédure mathématique indique les similitudes ou dissimilitudes de la courbe par rapport à elle-même, au cours du temps, en calculant la corrélation de séries de mesures sur des intervalles de temps déterminé. Au trot normal, une foulée complète comprend deux mouvements dorsoventraux similaires, c'est pourquoi, un pic de corrélation doit être présent à chaque intervalle de temps correspondant à chaque demi-foulée.

La fonction d'autocorrélation donne les pics périodiques de corrélation correspondant aux demi-foulées. La valeur maximale du pic de corrélation est égale à 1 et indique que la série de mesure est exactement similaire à elle-même.

Les deux premiers pics des courbes d'autocorrélation fournissent deux coefficients de corrélation (SYM et REG) qui quantifient respectivement la symétrie de la locomotion, c'est-à-dire la similitude entre les mouvements droit et gauche, et la régularité de la locomotion, c'est-à-dire la similitude entre la foulée_n et la foulée_{n+1}. De plus, par combinaison de ces deux coefficients de corrélation, on dispose de deux autres variables : RATIO et SUM (Barrey et Desbrosse, 1996) :

$$\text{RATIO} = 100 \times \frac{\text{SYM}}{\text{REG}}$$

$$\text{SUM} = 100 \times (\text{SYM} + \text{REG})$$

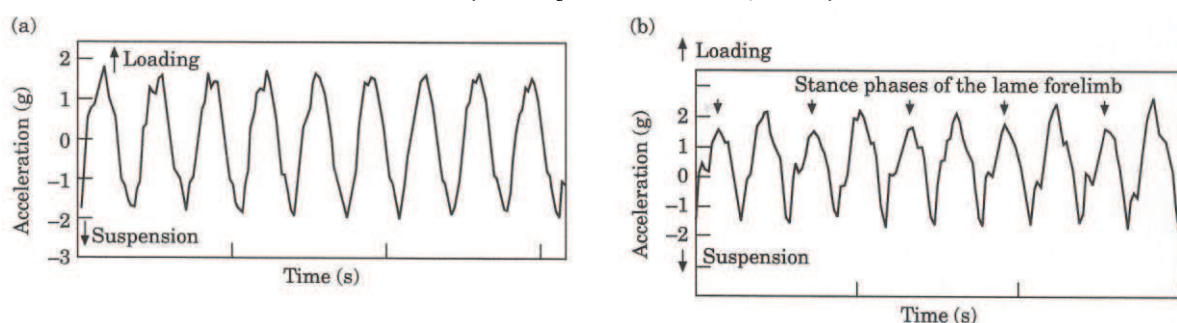
Lorsqu'au trot, les foulées successives sont peu répétitives, les deux coefficients diminuent, et l'allure se distingue par une faible valeur de la variable SUM. Lorsque les foulées sont continuellement asymétriques, le coefficient de corrélation entre les mouvements de droite et de gauche, SYM, est plus petit que le coefficient de corrélation entre les mouvements de deux foulées successives, REG, donc le ratio devient inférieur ou égal à 1. Ainsi, pour que la locomotion soit considérée comme symétrique, la somme des coefficients de symétrie et de régularité doit rester élevée ; et leur ratio doit être supérieur à 1.

Des normes d'interprétation de ces paramètres accélérométriques, SYM et REG, ont été établies (Barrey et Desbrosse, 1996) :

Les auteurs estiment ainsi que pour un cheval sain :

- au pas : SYM > 95% et REG > 185/200
- au trot : SYM > 97% et REG > 196/200

Figure 9 : Courbes des accélérations dorsoventrales mesurées sur le sternum de chevaux au trot (Barrey et Desbrosse, 1996)



(a) : Cheval sain, présentant des index de symétrie (>97%) et de régularité (>196/200) normaux

(b) : Cheval boiteux, présentant des index de symétrie (94%) et de régularité (174/200) faibles. Les flèches indiquent une réduction de charge lors de la phase d'appui du membre boiteux.

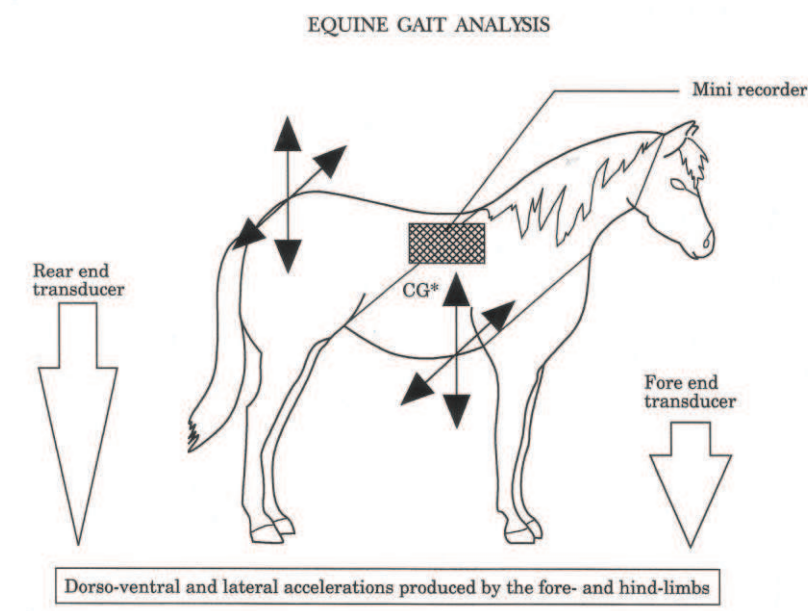
Lorsqu'une boiterie est présente, une réduction de l'amplitude d'accélération maximale est observée toutes les deux demi-foulées (Figure 9), ce qui indique que la douleur induit une diminution de la force verticale pendant la phase d'appui du membre boiteux (Barrey et Desbrosse, 1996).

- (b) Utilisation du signal accélérométrique latéro-médial pour identifier le membre boiteux (Barrey et Desbrosse, 1996)

La courbe représentant l'accélération latéro-médiale en fonction du temps est moins répétitive que celle représentant l'accélération dorso-ventrale. Néanmoins, cette courbe est altérée par la boiterie, ce qui peut permettre de détecter le côté où le cheval reporte la charge. Le cheval réduit l'accélération latérale et médiale au cours de la phase de soutien du membre boiteux. Cette méthode a permis d'identifier le membre boiteux seulement chez 13 chevaux /27 (Barrey et Desbrosse, 1996). Les auteurs reconnaissent que l'analyse du signal accélérométrique latéro-médial doit être améliorée pour pouvoir identifier plus exactement le membre boiteux.

Un accéléromètre placé sur le sternum permettant la détection de boiteries antérieures ; par la suite, pour détecter les boiteries postérieures, un deuxième accéléromètre fût donc placé sur le sacrum (Figure 10 ; Barrey, 1999). En effet, il a été démontré par une étude cinématique que la mesure des accélérations de la croupe donne une information spécifique sur la boiterie postérieure (Buchner *et al.*, 1993).

Figure 10 : Mesures accélérométriques pour la quantification des boiteries (Barrey, 1999)



Le dispositif comporte deux transducteurs, contenant chacun deux accéléromètres : le premier est fixé sur le sternum à l'aide d'une sangle élastique et le second est fixé sur le sacrum. Les mouvements des antérieurs et des postérieurs sont enregistrés continuellement au cours de l'examen locomoteur, au pas et au trot.

En conclusion, la localisation des accéléromètres sur le sternum favorise la détection des boiteries antérieures. Les boiteries postérieures sont mieux détectées en fixant un autre accéléromètre sur le sacrum (Barrey, 1999). Néanmoins très peu d'études ont été menées en utilisant deux accéléromètres (Weishaupt et al, 2001 ; Siegel, 2001).

(2) Evaluation de la symétrie à partir du tracé du déplacement de l'accéléromètre

Comme nous l'avons vu, lorsque le cheval se déplace à une allure régulière, le signal de l'accélération dorsoventrale présente un profil périodique régulier. L'accélération correspond à la dérivée seconde du déplacement par rapport au temps, et à la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Ainsi, en intégrant deux fois le paramètre accélération, on en déduit le déplacement du capteur accélérométrique.

Le déplacement vertical des capteurs accélérométriques se présente sous la forme d'une sinusoïde, comportant deux ondulations par foulée, à laquelle la décomposition en série de

Fourier peut être appliquée. Un calcul des deux premières harmoniques de la série de Fourier permet de déterminer un indice de symétrie global (Audigié *et al.*, 2002), comme nous l'avons vu précédemment (II,B,3,a).

Pour quantifier la symétrie de la locomotion, l'analyse de Fourier, appliquée au tracé du déplacement de l'accéléromètre, est aujourd'hui une technique très souvent utilisée, soit telle qu'elle a été présentée par Audigié *et al.* en 2002, soit avec une légère variante (Keegan, 2001).

d. Méthode accélérométrique appliquée dans les conditions de l'exercice sportif

Barrey *et al.* (1994) ont développé une méthode accélérométrique d'analyse de la locomotion équine dans l'objectif de l'appliquer dans les conditions de l'exercice sportif, afin de prévoir les performances sportives des chevaux. Le « Système Equimetrix » a donc été conçu spécialement pour mesurer les caractéristiques de la foulée sur le terrain. Il a été utilisé sur diverses catégories de chevaux : les chevaux de selle, en sauts d'obstacle, et les chevaux de course, galopeurs et trotteurs. Toutes ces études portant sur le « Système Equimetrix » n'utilisent qu'un seul accéléromètre placé sur le sternum, à proximité du centre de gravité du cheval.

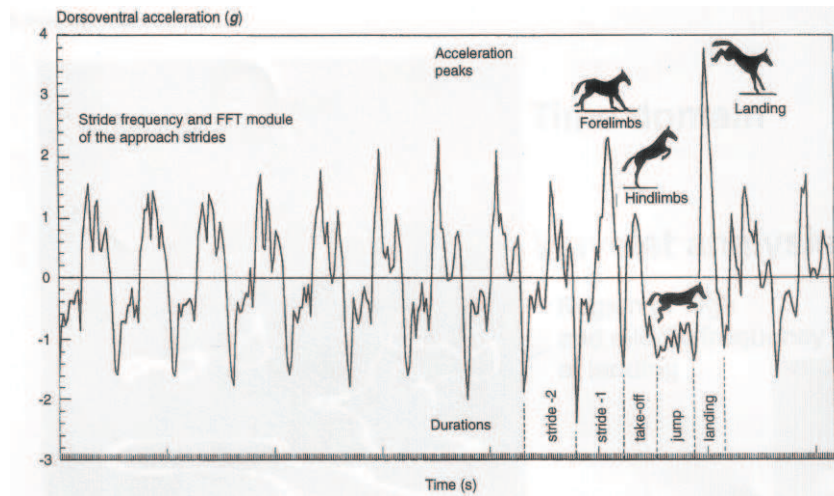
(1) Méthode accélérométrique appliquée chez les chevaux de sauts d'obstacle

En 1997, Barrey et Galloux ont étudié la technique de sauts d'obstacle des chevaux en utilisant la méthode accélérométrique (« Système Equimetrix », Barrey *et al.*, 1994). Sur un parcours de 14 obstacles d'environ 1m20, l'accélération dorso-ventrale est mesurée en continu en regard du sternum. A partir du tracé accélérométrique sont obtenus de nombreux paramètres descriptifs de la technique de saut :

- fréquence et durée moyennes des foulées à l'abord de l'obstacle,
- durées de la phase d'appui des postérieurs à la détente, du planer, et de la phase d'appui des antérieurs à la réception,
- pics d'accélération produits à la détente initialement par les antérieurs (A), puis les postérieurs (P), et calcul du ratio A/P,
- pic d'accélération produit à la réception par les antérieurs.

La figure 11 montre la correspondance entre les différentes phases du saut et le tracé accélérométrique.

Figure 11 : Correspondance entre les différentes phases du saut et le tracé accélérométrique



L'analyse de ces différents paramètres peut permettre d'apprécier la qualité technique du saut chez chaque cheval. Barrey et Galloux (1997) ont montré que les variations individuelles de la technicité du saut sont liées aux variations de la force extérieure développée par les antérieurs et les postérieurs au cours de la détente. Les variations des capacités individuelles au saut d'obstacles sont principalement liées aux différences portant sur les caractéristiques de la foulée à l'abord de l'obstacle, et sur l'impulsion produite par les antérieurs et les postérieurs lors de la détente.

(2) Méthode accélérométrique appliquée chez les chevaux de course

La méthode accélérométrique a également été appliquée sur les chevaux de course, sur piste, lors de séances d'entraînement intensives comprenant une session à vitesse maximale individuelle.

Chez les trotteurs de course, Barrey et al. (1995) ont mené une étude avec l'objectif de montrer la relation entre le profil de l'appareil locomoteur et les performances en course, et déterminer des variables de la foulée ayant une valeur prédictive sur les performances futures. Le « Système Equimetrix » (Barrey et al., 1994), mesurant les accélérations dorso-ventrale et longitudinale en regard du sternum, fournit, après un temps de traitement minimum, quelques variables synthétiques de la foulée. 24 trotteurs français, répartis en 3 groupes en fonction de leurs performances, sont soumis à un test locomoteur standardisé, sur la même piste de course. Quelques relations significatives sont trouvées entre les caractéristiques de la foulée mesurées à vitesse maximale individuelle et les performances en course obtenues dans l'année. La vitesse maximale, la fréquence de la foulée et la longueur de la foulée étaient corrélées modérément avec l'index de performances ; la vitesse maximale était corrélée davantage à la longueur qu'à la fréquence de la foulée. Par contre, la symétrie et la régularité du trot n'étaient pas reliées significativement aux performances. Un trotteur performant doit avoir une vitesse maximale élevée, ce qui est obtenue principalement par une fréquence de foulées élevée (supérieure à 2,40 foulées/s).

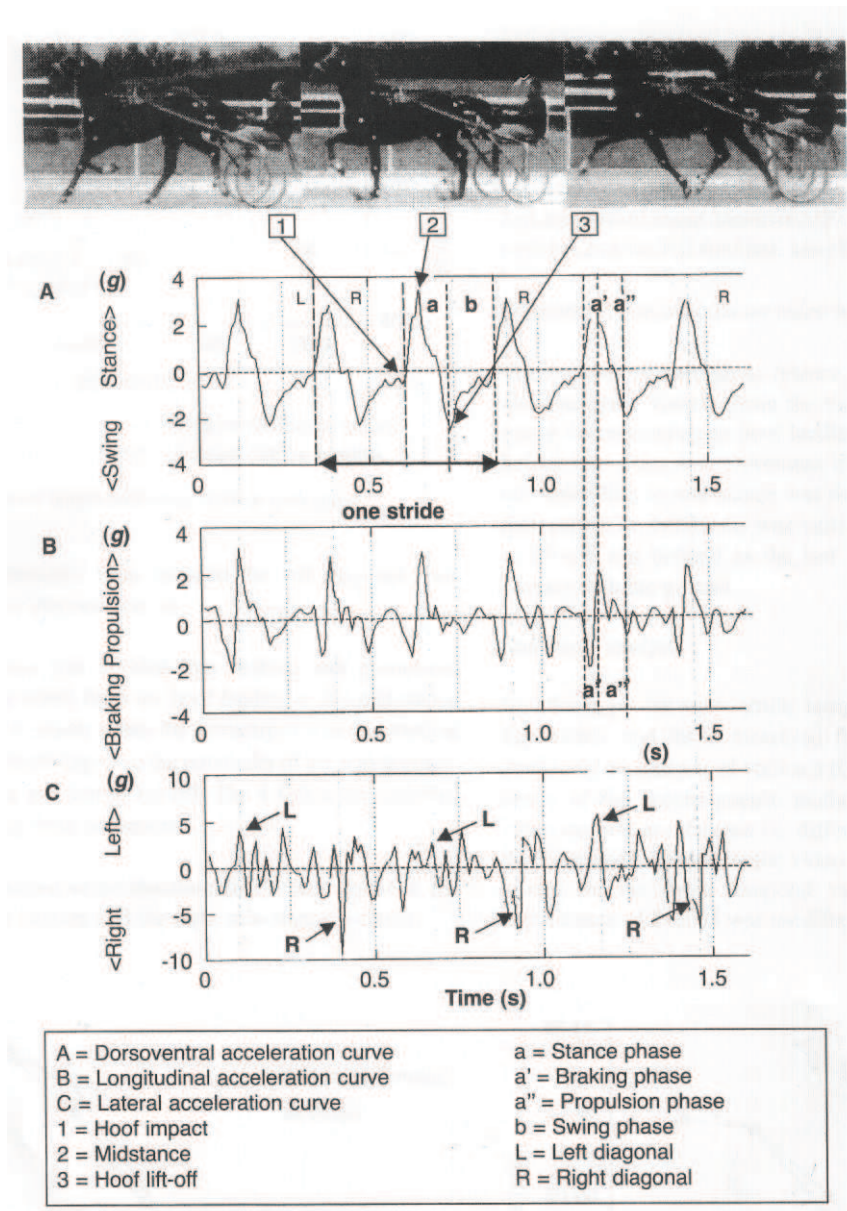
Cette étude conclut sur le fait que le dispositif accélérométrique est efficace pour tester les trotteurs, dans la mesure où des protocoles standardisés sont développés pour la mesure et l'analyse des données accélérométriques. Les paramètres de la foulée, mesurés à vitesse maximale individuelle, peuvent être utilisés pour estimer les capacités en course des jeunes

trotteurs et prédire leurs performances potentielles dans un objectif de sélection (Barrey, 1995).

Une autre étude a été menée en 2002 chez les trotteurs pour décrire les différentes phases de la foulée à partir des tracés accélérométriques (Leleu *et al.*, 2002).

Les accélérations dorso-ventrales, longitudinales, et latéro-médiales, sont mesurées en continu en regard du sternum lors d'une séance d'entraînement intensive (« Système Equimetrix », Barrey *et al.*, 1994). Quelques points spécifiques du tracé accélérométrique sont repérés : début de l'amortissement (le pied arrive au contact du sol), position verticale du membre lors de la phase d'appui (« midstance ») et fin de la rétraction (le pied quitte le sol). Ils permettent d'identifier les différentes phases de la foulées : la phase d'appui, comprenant la protraction (phase crâniale) et la rétraction (phase caudale) et la phase de soutien. La figure 12 présente les points spécifiques du tracé accélérométrique permettant de repérer les différentes phases de la foulée. Ces points ont été identifiés en corrélant les données accélérométriques à des données cinématiques obtenues par un système d'analyse vidéo du mouvement utilisant une caméra à grande vitesse (Leleu *et al.*, 2002).

Figure 12 : Correspondance entre les images vidéo et les courbes d'accélération dorso-ventrale, longitudinale et latéro-médiale



A partir de ces points de repère sont alors déterminées différentes variables temporelles de la foulée (Leleu *et al.*, 2002):

- fréquence et durée moyenne de la foulée,
- durée de phase d'appui de chaque diagonal,
- durée des phases de protraction et de rétraction pour chaque diagonal.

De même, chez les galopeurs, les accélérations dorso-ventrale et longitudinale sont mesurées en continu lors d'une séance d'entraînement intensive (« système Equimetrix », Barrey *et al.*, 2001). L'analyse du tracé accélérométrique permet l'obtention de diverses variables temporelles de la foulée :

- fréquence et longueur moyenne de la foulée,
- durées correspondantes à l'appui du premier postérieur, puis du diagonal, du dernier antérieur et de la phase de suspension (allures à 4 temps),
- régularité de la foulée, énergie de propulsion, énergie de détente, etc.....

Ces variables peuvent alors permettre d'apprécier les possibilités en course des jeunes pur-sang et d'adapter leur entraînement (Barrey *et al.*, 2001).

Ainsi, nous voyons que la méthode accélérométrique est tout à fait adaptable à l'utilisation en clinique sur le terrain, y compris dans les conditions de l'exercice sportif. L'avantage principal de cette technique est sa simplicité et sa rapidité d'utilisation (Barrey, 1999).

Dans les études présentées ci-dessus, la méthode accélérométrique a été appliquée, dans les conditions de l'exercice sportif, seulement à l'analyse descriptive de la foulée du cheval, avec un seul accéléromètre placé en regard du sternum ; mais pour l'instant aucune application à la quantification des boiteries n'a été envisagée.

e. Perfectionnement de la méthode accélérométrique

(1) Les centrales de mesures inertielles (CMI)

Avec la mise sur le marché d'accéléromètres triaxiaux à faible coût, la mesure directe de l'accélération est devenue possible, comme nous l'avons vu précédemment. Cependant, le processus aboutissant à la détermination de la vitesse et du déplacement par intégration de l'accélération doit être utilisé avec prudence. Les erreurs s'accumulent rapidement au cours du processus d'intégration, et des informations supplémentaires sur les positionnements initiaux sont nécessaires pour déterminer les constantes d'intégration (Pfau *et al.*, 2005).

Lors du processus d'intégration, les modifications d'orientation de l'accéléromètre doivent être prises en compte, sinon l'accéléromètre mesure l'accélération par rapport à sa propre orientation et non par rapport au référentiel d'étude. L'orientation de l'accéléromètre peut être déterminée grâce à des gyroscopes angulaires (Pfau *et al.*, 2005). La vitesse angulaire fournie par le gyroscope peut être intégrée pour déterminer l'orientation ; ainsi 3 gyroscopes orthogonaux peuvent être utilisés pour déterminer l'orientation de l'accéléromètre triaxial. Néanmoins, avec ce système, de nouvelles erreurs d'intégration s'aggravent. Une solution est d'utiliser l'orientation connue de la composante verticale du champ magnétique de la terre, mesurée à l'aide d'un magnétomètre. Ainsi, l'association d'accéléromètres et de magnétomètres permettrait d'obtenir l'orientation en 3D de l'appareil (Pfau *et al.*, 2005). Les cellules de mesures inertielles sont donc constituées d'une combinaison de 3 accéléromètres, 3 gyroscopes, 3 magnétomètres et 1 thermomètre.

Pour le traitement des données, l'objectif est de déterminer les déplacements linéaires dans le repère global, à partir des accélérations linéaires dans le repère du capteur inertiel. Cela nécessite de réaliser une projection puis une double intégration des données accélérométriques. Les données accélérométriques sont projetées depuis le repère du capteur vers le repère global, à l'aide d'une matrice de rotation, définie par les angles d'Euler, angles de rotation autour des axes x, y et z (roulis, tangage et embardée). Puis, lors de l'intégration des données, les erreurs liées à l'intégration sont éliminées en considérant la locomotion comme régulière et du fait de la nature cyclique des mouvements ; cela signifie que les différences de positionnement entre deux foulées, ou séries de foulées, sont considérées comme nulles. La procédure d'intégration appropriée, associée à l'orientation estimée, permet de décrire le mouvement selon 6 degrés de liberté (3 rotations et 3 translations) (Pfau *et al.*, 2005).

Pfau *et al.* (2005) ont utilisé une centrale de mesure inertielle fixée sur le garrot d'un cheval examiné aux trois allures sur tapis roulant, et ont comparé les résultats obtenus à partir de

cette centrale à ceux fournis par une analyse cinématique en 3D. Ils ont montré que la centrale de mesure inertielle est capable de capturer des mouvements cycliques avec une précision comparable aux systèmes d'analyse vidéo du mouvement. Elle permet d'analyser une locomotion régulière et cyclique. Lors de cette étude la centrale de mesure inertielle a été utilisée sur tapis roulant et non sur le terrain, l'objectif étant de valider la méthode ; néanmoins les auteurs estiment que l'utilisation en extérieur sur un sol régulier est possible. La centrale de mesure inertielle est suffisamment petite et légère (35g ; 39x54x28mm) et elle peut être reliée à un petit ordinateur portable fixé sur l'animal, ou les données peuvent être transmises par télémétrie à haute fréquence. La technique permet d'enregistrer des séries de foulées, contrairement aux plateformes de force, et est moins coûteuse que les systèmes d'analyse vidéo du mouvement utilisés dans des conditions de terrain.

Pfau *et al.* (2007) ont ensuite utilisé la centrale de mesures inertielles dans les conditions de terrain pour quantifier les mouvements des tuber coxae chez des chevaux présentant une locomotion symétrique ou une boiterie postérieure modérée. Une analyse discriminante est utilisée pour différencier les chevaux sains et les chevaux boiteux. Deux classifications différentes sont réalisées : d'une part, chevaux sains / chevaux boiteux, et d'autre part, boiterie postérieure gauche / boiterie postérieure droite / absence de boiterie. L'analyse discriminante la plus adaptée repose sur le déplacement dorso-ventral du tuber coxae. Pour la première classification, une sensibilité de 89% est obtenue avec une spécificité de 75%. Pour la deuxième classification, tous les chevaux ont pu être correctement départagés dans les 3 catégories, par observation du tracé du déplacement de chaque tuber coxae, le critère principal étant le mouvement d'élévation de la hanche (hip-hike).

Cette étude a permis de vérifier l'adaptation du système de centrales de mesures inertielles aux conditions de terrain. Ce système présente l'avantage de nécessiter peu d'équipement au sol ; tout le matériel, à l'exception de l'ordinateur portable et du récepteur télémétrique, est sur le cheval ; et, en particulier, il n'y a pas besoin d'aire de calibrage. De plus, le système permet d'enregistrer les données en continu et sur un très grand nombre de foulées, ce qui améliore la précision des analyses statistiques. La seule restriction est le lien télémétrique entre le cheval et l'ordinateur, qui est généralement limité à environ 150m (Pfau *et al.*, 2007).

Une étude récente a également utilisé des centrales de mesures inertielles pour quantifier les boiteries postérieures (Church *et al.*, 2009). L'objectif de cette étude est de déterminer quels paramètres, parmi les repères anatomiques du tronc et de la partie proximale des membres postérieurs, sont les meilleurs indicateurs pour graduer et latéraliser une boiterie postérieure. 4 centrales de mesures inertielles sont placées sur le cheval, en regard du tuber sacrale, des deux tuber coxae et du garrot. L'analyse linéaire de discrimination est utilisée pour déterminer les paramètres les plus discriminatifs pour 2 scénarios : gradation de la boiterie et identification du membre boiteux. Les résultats montrent que le ratio d'énergie du tuber sacrale (calculé à partir de l'analyse de Fourier) est le meilleur indicateur du degré de la boiterie ; et l'indice de symétrie directionnel des tuber coxae est le meilleur paramètre pour identifier le membre boiteux, en particulier si aucune donnée temporelle de la foulée n'est fournie par un capteur placé en partie distale des membres. Pour les deux scénarios combinés, l'indice de symétrie quantitatif du tuber sacrale est le paramètre le plus adapté (Church *et al.*, 2009).

(2) Association d'une centrale de mesures inertielles (CMI) et d'un GPS

A la fois le GPS et la CMI sont très utilisés dans les études biomécaniques. Les GPS de haute précision peuvent fournir des informations concernant la vitesse et le déplacement au sein de la foulée, mais leurs applications sont limitées étant donné la taille et le coût des appareils.

Les CMI fournissent un tracé accélérométrique à partir duquel peuvent être obtenues les fluctuations à court-terme de la vitesse et de la position, mais des erreurs d'intégration altèrent les données sur des durées plus longues (Tan *et al.*, 2008). L'association de GPS et CMI, dans des centrales volumineuses et coûteuses, a été beaucoup utilisée dans les domaines de la navigation et des enquêtes judiciaires. Tan *et al.* (2008) ont présenté un procédé de fusion de données, un filtre Kalman, permettant de corréliser les données fournies par le GPS à celles fournies par la CMI. Ils ont ainsi expérimenté la combinaison d'une CMI à faible coût et d'un GPS à faible coût, sur un cycliste et un coureur, en comparant les résultats obtenus à ceux fournis par un GPS de haute définition. Les résultats montrent que l'association du GPS et de la CMI permet d'améliorer la précision des données, en combinant les données à basse fréquence du GPS et les données à haute fréquence de la CMI. L'association du GPS et de la CMI présente l'avantage de fournir des données plus fiables, en particulier sur la vitesse, pour des mouvements irréguliers avec des modifications brusques d'accélération (Tan *et al.*, 2008).

Ainsi, en complétant les données fournies par les accéléromètres aux données de positionnement du capteur à chaque instant t , les centrales de mesures inertielles offrent des mesures plus précises des mouvements du corps. Ce sont des outils plus perfectionnés, pouvant réaliser des mesures en continu, et qui sont utilisables dans des conditions de terrain.

f. Etude comparative de la méthode accélérométrique et de la méthode cinématique

(1) Comparaison des 2 méthodes pour l'analyse descriptive de la locomotion

Comme nous l'avons vu précédemment, Leleu *et al.* (2002) ont repéré les différentes phases de la foulée des trotteurs, dans les conditions de l'entraînement, c'est-à-dire attelés sur piste, à partir du tracé accélérométrique.

Pour cela, les auteurs ont comparé les données accélérométriques à des données cinématiques obtenues par un système d'analyse vidéo du mouvement utilisant une caméra à grande vitesse. La locomotion du cheval est enregistrée d'une part, à l'aide d'une caméra vidéo à haute fréquence (200 Hz) et d'autre part, à l'aide du « Système Equimetrix », les 2 appareils étant synchronisés. Pour le système d'analyse vidéo du mouvement, de nombreux marqueurs sont placés sur les antérieurs et les postérieurs des chevaux, depuis la partie proximale jusqu'en partie distale. La caméra à grande vitesse est fixée au sol et permet d'enregistrer les images sur une longueur de 40m, ce qui correspond à 6 à 10 foulées. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) entre les variables temporelles de la foulée (durée moyenne de la foulée, durée moyenne des phases d'appui, de protraction et de rétraction, pour chaque diagonal), mesurées soit à l'aide du « Système Equimetrix », soit à l'aide du système d'analyse vidéo du mouvement (Leleu *et al.*, 2002).

(2) Comparaison des 2 méthodes pour la quantification de la symétrie de la locomotion

Keegan *et al.* (2004) ont réalisé une étude dans le but de comparer un système accéléromètre-gyroscopie (système A-G) avec un système d'analyse vidéo du mouvement (Video-based Motion Analysis System = VMSA) pour la détection et la quantification des boiteries antérieures et postérieures. Les chevaux sont équipés avec un premier accéléromètre sur la

nuque et un second sur la croupe, deux gyroscopes sur les sabots antérieur droit et postérieur droit, et un émetteur-transmetteur. Les informations fournies par les deux systèmes, A-G et VMSA, lors de l'examen d'un cheval au trot sur tapis roulant, permettent d'obtenir le positionnement de la tête, de la croupe et des pieds antérieur et postérieur droit. La boiterie est quantifiée en fonction de l'asymétrie de la tête et du bassin, en utilisant l'analyse de Fourier. Les deux systèmes sont comparés par des analyses de corrélation et de concordance. Les résultats révèlent une bonne corrélation des deux systèmes : $r^2=0.9544$ pour les antérieurs et $r^2=0.8235$ pour les postérieurs, ainsi qu'une bonne concordance, avec une graduation des boiteries postérieures plus sévère avec le système A-G qu'avec le système VMAS. Les résultats de cette étude sont donc très encourageants pour le développement de la méthode accélérométrique qui permet d'obtenir des résultats fiables pour la détection et la quantification des boiteries, et dont l'utilisation simplifiée permet l'application dans des conditions de terrain.

En conclusion, nous voyons que la méthode accélérométrique fournit une mesure fiable de la symétrie et de la régularité de la locomotion au pas et au trot. Etant donné ses possibilités d'adaptation aux conditions de terrain, la méthode accélérométrique semble la méthode quantitative la plus pertinente pour une application en pratique.

3. Conclusion

La méthode accélérométrique montre de nombreux avantages pour l'application sur le terrain. En effet, elle peut être utilisée plus simplement, tout en apportant des résultats satisfaisants pour un objectif clinique de détection et de quantification des boiteries. Les dispositifs accélérométriques ambulatoires déjà étudiés ont mis en évidence la bonne adaptation de la méthode sur le terrain. Par contre, peu d'études ont été réalisées dans les conditions de l'exercice sportif, et en particulier chez le trotteur de course, sur piste, au trot à grande vitesse. Le « Système Equimetrix » a été utilisé sur piste, montrant des résultats satisfaisants pour l'analyse descriptive de la locomotion (Leleu *et al.*, 2002) ; mais la méthode n'a pas été appliquée à la quantification de la symétrie de la locomotion. L'application de la méthode accélérométrique chez le trotteur de course sur piste à grande vitesse, pour la détection et la quantification des boiteries, semble donc très prometteuse.

D. Critères d'évaluation de la symétrie de la locomotion du cheval par les méthodes quantitatives

Les méthodes d'analyse objective de la locomotion du cheval, quelles soient cinématiques ou cinétiques, fournissent des données sur les déplacements dans l'espace de différentes parties du corps. Ces données sont ensuite utilisées pour calculer différents paramètres permettant de quantifier la boiterie. Quels sont les paramètres les plus pertinents et les plus utilisés pour quantifier les boiteries antérieures et postérieures ?

Tout d'abord, plusieurs études convergent vers l'idée que l'évaluation des mouvements de la tête et du dos est plus exacte que l'évaluation des mouvements des membres pour détecter et quantifier une boiterie (Keegan, 2007).

1. Evaluation d'une boiterie antérieure par les méthodes quantitatives

L'évaluation d'une boiterie antérieure repose le plus souvent sur l'analyse du mouvement de la tête, tel que le font les vétérinaires praticiens lors de l'examen dynamique. Les mouvements de la tête peuvent être analysés selon différents paramètres :

- Mesures du déplacement vertical et de l'accélération de la tête (Buchner *et al.*, 1996)

Sur un cheval au trot présentant une boiterie antérieure, les modifications les plus évidentes sont observées sur l'amplitude de déplacement et l'accélération verticale maximale de la tête ; le meilleur indicateur de quantification de boiterie antérieure étant l'accélération verticale maximale. Par contre, les modifications portant sur les mouvements du garrot sont moindres, ne concernant que la phase d'appui du membre boiteux. (Buchner *et al.*, 1996).

- Différence de hauteur minimale de la tête entre les deux phases d'appui de chaque membre lors d'une foulée

Sur des chevaux présentant une maladie naviculaire, l'anesthésie digitale palmaire sur l'antérieur droit entraînait une diminution de la différence de hauteur minimale de la tête de 6.4cm avant anesthésie à 1.6cm après anesthésie. Le déplacement vertical total au cours d'une foulée constituait aussi un bon indicateur de symétrie. Par contre, la diminution de la différence de hauteur maximale de la tête, entre les deux phases de soutien de chaque membre, n'était pas significative (Keegan *et al.*, 1997).

- Méthode de décomposition du signal de déplacement vertical de la tête (Keegan *et al.*, 2001)

Keegan *et al.* (2001) ont étudié une deuxième méthode d'évaluation de la symétrie des mouvements de la tête, puisque, pour de discrètes boiteries, les mesures portant sur la hauteur de la tête ne semblent pas suffisamment sensibles, et, les mouvements de tête extérieurs, liés à l'excitation du cheval, interfèrent sur ces mesures (Keegan *et al.*, 2001). La méthode de décomposition repose sur le fait que le signal de déplacement vertical de la tête est formé de 3 composantes (harmoniques) : la composante A1 qui correspond à l'amplitude du mouvement vertical de la tête causé par la boiterie antérieure, et la composante A2 qui correspond à l'amplitude du mouvement vertical bi-phasique naturel de la tête, et enfin une composante extérieure. Après induction d'une boiterie antérieure, la valeur de A1 augmente tandis que celle de A2 reste constante (Keegan *et al.*, 2001).

Cette méthode de décomposition du signal est proche de la décomposition en série de Fourier présentée par Peham *et al.* (1996) et Audigié *et al.* (2002). La méthode de Peham *et al.* (1996), également appliquée au déplacement vertical de la tête, consiste à calculer les coefficients de Fourier après une filtration passe haut du signal qui élimine les mouvements non périodiques extérieurs (Peham *et al.*, 1996). Peham *et al.* (1999) ont comparé une analyse cinématique 2-D et la transformation de Fourier à l'évaluation subjective d'un clinicien expérimenté pour la quantification d'une boiterie antérieure discrète à modérée. Les résultats montraient que les deux méthodes étaient parfaitement corrélées en ce qui concerne l'identification du membre boiteux ; par contre, les résultats différaient pour la gradation de la boiterie (Peham *et al.*, 1999).

Par ailleurs, une boiterie antérieure peut aussi être appréciée en observant les mouvements du tronc.

- Mesure de l'accélération dorso-ventrale globale du corps et calcul d'indices de symétrie et de régularité (Barrey et Desbrosse, 1996)

Le « Système Equimetrix », présenté au II,C,2,b, était constitué d'un capteur accélérométrique placé en regard de la partie caudale du sternum, qui mesurait l'accélération dorso-ventrale globale. Des indices de symétrie et de régularité étaient calculés à partir du signal accélérométrique (II,C,2,c). Les valeurs moyennes des coefficients de symétrie et de régularité diminuaient lorsque le degré de boiterie augmente. Cependant, les différences observées sur les valeurs moyennes des coefficients entre deux grades de boiterie successives n'étaient pas toujours significatives. Les boiteries postérieures étaient plus difficiles à détecter que les boiteries antérieures, du fait de la localisation du dispositif en regard du sternum (Barrey et Desbrosse, 1996).

- Mesure du déplacement vertical du garrot (T6 et T13) et calcul d'un indice de symétrie global en utilisant l'analyse de Fourier (Audigié *et al.*, 2002) :

L'indice de symétrie global du déplacement vertical du garrot, pour les marqueurs T6 et T13, était significativement diminué chez tous les chevaux présentant une boiterie antérieure modérée à sévère ; et chez 2 chevaux sur 5 présentant une discrète boiterie antérieure (Audigié *et al.*, 2002).

En conclusion, nous voyons que pour évaluer une boiterie antérieure, les mesures portent le plus souvent sur les mouvements de la tête. Les mesures directes du déplacement (différences de hauteur de la tête) sont significativement modifiées lors de boiterie antérieure, mais elles manquent de spécificité, et peuvent être altérées lors des mouvements volontaires du cheval (excitation, curiosité,...). De meilleurs résultats semblent obtenus en utilisant une méthode de décomposition du signal de déplacement ; la transformation de Fourier est très souvent utilisée. Par ailleurs, les déplacements verticaux du tronc, et en particulier du garrot, permettent également de quantifier les boiteries antérieures.

2. Evaluation d'une boiterie postérieure par les méthodes quantitatives

L'évaluation d'une boiterie postérieure repose sur l'analyse du mouvement du bassin. Les mouvements du bassin sont analysés selon différents paramètres, portant soit sur l'angle de la croupe (tuber sacrale), soit sur l'angle de la hanche (tuber coxae) :

- Mesures de l'amplitude du déplacement vertical du sacrum (Buchner *et al.*, 1996)

Sur un cheval au trot présentant une boiterie postérieure, l'amplitude de déplacement du tuber sacrale était significativement réduite lors de l'appui du membre boiteux. L'amplitude de déplacement du tuber sacrale était le meilleur indicateur pour quantifier une boiterie postérieure (Buchner *et al.*, 1996). Par contre, la hauteur minimale et l'accélération verticale du tuber sacrale n'étaient pas significativement modifiées. L'amplitude de déplacement des deux tuber coxae peut être également indicateur de symétrie, mais la sensibilité est moindre par rapport au tuber sacrale (Buchner *et al.*, 1996).

- Mesure du ratio du déplacement vertical total au cours d'une foulée entre les deux tuber coxae gauche et droit (Kramer *et al.*, 2000).

Les auteurs ont déterminé les variables cinématiques les plus sensibles pour détecter une amélioration d'une boiterie postérieure, induite par une arthrite inter-tarsienne distale et tarso-métatarsienne, après anesthésie intra-articulaire. Ces variables étaient la longueur de protraction du membre postérieur et le ratio du déplacement vertical total du tuber coxae gauche par rapport au tuber coxae droit. Par contre, la différence de hauteur minimale entre les deux phases d'appui de chaque membre, mesurée en regard des tuber coxae et du tuber sacrale, n'était pas significativement modifiée (Kramer *et al.*, 2000).

- Méthode de décomposition du signal du déplacement vertical du bassin (Kramer *et al.*, 2004):

Le signal du déplacement vertical du bassin est décomposé en une composante périodique A1 se produisant à chaque demi-foulée (représentant le mouvement vertical du bassin lors de boiterie) et une autre composante périodique A2 se produisant à chaque foulée (représentant le mouvement vertical normal du bassin d'un cheval au trot). La composante A1 est dénommée « amplitude de la boiterie » et la composante A2 « amplitude du mouvement pelvien normal ». Les résultats montraient que la composante A1 et le ratio A1/A2 différaient significativement entre les chevaux sains et les chevaux présentant une boiterie postérieure discrète ou modérée (Kramer *et al.*, 2004).

Les modifications des variables correspondant aux différences de hauteur minimale et maximale du bassin entre chaque demi-foulée étaient également significatives ; néanmoins, la différence de hauteur minimale du bassin était une variable moins sensible (Kramer *et al.*, 2004).

Le mouvement de rotation du bassin par rapport à la colonne vertébrale interfère sur les déplacements des tuber coxae. Chez un cheval présentant une locomotion symétrique, le déplacement vertical de chaque tuber coxae est normalement asymétrique. Par contre, le déplacement vertical du bassin au niveau des tuber sacrale est presque symétrique. De plus, anatomiquement, le degré d'asymétrie naturelle entre les deux tuber coxae est variable. Ainsi, la comparaison des mouvements verticaux des tuber coxae est un paramètre difficile à interpréter pour différencier une locomotion symétrique d'une boiterie postérieure modérée (Kramer *et al.*, 2004).

- Mesure du déplacement vertical du tuber sacrale (LS) et calcul d'un indice de symétrie global en utilisant l'analyse de Fourier (Audigié *et al.*, 2002) :

L'indice de symétrie global du déplacement vertical de tous les marqueurs du dos était significativement diminué, chez tous les chevaux présentant une boiterie postérieure modérée à sévère, la diminution étant plus marquée caudalement, et chez 2 chevaux sur 5 présentant une discrète boiterie postérieure (Audigié *et al.*, 2002).

Peham *et al.* (2001) utilisait également la transformation de Fourier appliquée au déplacement vertical du tuber sacrale pour calculer un indice de symétrie. Le calcul de ce ratio diffère légèrement car Peham *et al.* (2001) utilisaient l'amplitude des harmoniques tandis que Audigié *et al.* (2002) utilisaient l'énergie des harmoniques. Peham *et al.* (2001) comparait une analyse cinématique 2-D et la transformation de Fourier à l'évaluation subjective d'un clinicien expérimenté pour la quantification d'une boiterie postérieure discrète à modérée. Les résultats montraient que, comme pour les antérieurs, les deux méthodes sont parfaitement corrélées en ce qui concerne l'identification du membre boiteux ; par contre, les résultats

différait pour la gradation de la boiterie, et la correspondance des résultats était plus faible par rapport à celle obtenue pour les antérieurs (Peham *et al.*, 1999).

En conclusion, au vu des différentes études, il apparaît que le meilleur indicateur de symétrie pour évaluer une boiterie postérieure est l'amplitude du déplacement du tuber sacrale. Les indicateurs portant sur les tuber coxae sont plus difficiles à interpréter étant donné l'asymétrie naturelle des mouvements de l'angle de la hanche ; par contre, ceux-ci semblent plus pertinents pour latéraliser l'asymétrie, lorsque l'on ne dispose pas d'un repère temporel sur le posé des diagonaux successifs (Church *et al.*, 2009). Les méthodes de décomposition du signal donnent des résultats satisfaisants ; la transformation de Fourier est très souvent utilisée.

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE :

Validation d'un système accélérométrique de quantification des boiteries chez le trotteur attelé dans les conditions de l'exercice sportif intensif.

I. INTRODUCTION

A. Contexte expérimental

Comme nous l'avons vu en première partie, les méthodes cinématiques fournissent tous les paramètres relatifs aux déplacements des différents segments du corps. Appliqués dans le cadre de l'analyse des boiteries, elles permettent une description précise et quantitative des signes cliniques, et participent ainsi à l'amélioration des connaissances sur les différents types de boiteries, et la façon dont les chevaux gèrent les douleurs locomotrices. En revanche, un inconvénient majeur est constitué par la petite taille du champ d'enregistrement permis par cette méthode (quelques mètres), ce qui limite le nombre de foulées enregistrables. Par ailleurs, le coût élevé qu'elles engendrent et l'importance de la maintenance technique qu'elles nécessitent limitent les applications de ce type de système à un environnement de laboratoire (Pourcelot *et al.*, 1997 ; Barrey, 1999). De même, la plupart des méthodes cinématiques mesurant les forces de réactions du sol (plates-formes de force, fers instrumentés, jauges de contrainte, et tapis roulant instrumentés) sont surtout adaptées à la recherche. La méthode accélérométrique semble donc être l'approche la plus pratique et la plus abordable pour une utilisation sur le terrain, comme cela a été vérifié dans plusieurs études. De plus, cette méthode permet d'obtenir des mesures fiables de la symétrie locomotrice, tout à fait satisfaisants pour une utilisation en pratique courante.

Aujourd'hui, le nombre d'applications concrètes disponibles pour les entraîneurs, les cavaliers, les éleveurs et les praticiens vétérinaires est trop limité comparé à la quantité de travail effectué dans l'analyse quantitative de la locomotion équine. Pour améliorer ceci, un effort technique important est nécessaire, en utilisant toutes les connaissances obtenues sur la locomotion équine, pour créer des applications de la méthode accélérométrique dans des conditions de terrain (Barrey, 1999). La quantification des troubles locomoteurs est particulièrement utile lorsque le cheval se déplace à grande vitesse. En effet, il est fréquent que ces troubles locomoteurs n'apparaissent que lors de l'exercice sportif intensif, et non au petit trot dans les conditions de l'examen clinique standard ; et l'observation directe est alors rendue très difficile par la vitesse de déplacement.

Les dispositifs accélérométriques ambulatoires déjà étudiés ont mis en évidence la bonne adaptation de la méthode sur le terrain, et ses capacités pour analyser la symétrie locomotrice. Par contre, aucune étude n'a été réalisée chez le trotteur de course sur piste pour la détection et la quantification des boiteries.

B. Cahier des charges du système à mettre en oeuvre

L'objectif de ce travail expérimental est d'appliquer la méthode accélérométrique chez le trotteur de course à grande vitesse pour une utilisation pratique courante. Le système de mesure doit donc être très simple, afin d'être utilisé rapidement et facilement par les vétérinaires praticiens.

Aussi afin de répondre à ces contraintes (notamment lors de l'examen locomoteur à grande vitesse), le système que nous souhaitons mettre en place devra répondre à de nombreux objectifs techniques :

➤ Concernant son utilisation :

- le système doit être adaptable sur tous les chevaux,
- la fixation doit être aisée et rapide,
- le système doit fonctionner aussi bien sur des chevaux trottés en main à faible vitesse que sur des trotteurs lancés sur piste à grande vitesse (environ 50km/h),
- le système ne doit pas modifier de manière significative la locomotion du cheval.

➤ Concernant les résultats :

- les résultats obtenus doivent être clairs et rapidement interprétables,
- la méthode doit permettre une mesure fiable et répétable de la symétrie locomotrice,
- un indicateur de symétrie doit être indicateur d'un certain degré de boiterie, et la méthode doit permettre l'identification du membre boiteux,
- la méthode doit être suffisamment sensible pour assurer que même des modifications faibles soient reflétées par des altérations de l'indicateur de symétrie.

C. Objectifs de l'étude expérimentale

Les objectifs de cette étude étaient donc de :

1 – mettre en place une méthode de mesure accélérométrique capable de quantifier les boiteries chez le trotteur de course à grande vitesse, et répondant au cahier des charges ci-dessus ;

2 – vérifier sa simplicité d'utilisation et son adéquation avec les contraintes de terrain ;

3 – valider son efficacité en comparant les résultats obtenus à ceux fournis par l'évaluation clinique d'un collège d'experts.

II. MATERIEL ET METHODE

A. Matériel

1. Chevaux testés

Les chevaux testés au cours de cette étude sont 12 trotteurs de course examinés au CIRALE (Calvados, 14) par le Pr. DENOIX, pendant l'hiver 2006-2007, afin d'évaluer des contre-performances en course (Tableau 3). Un accord préalable est obtenu du propriétaire ou de l'entraîneur pour la réalisation d'enregistrements dans le cadre d'un protocole de recherche.

Tableau 3 : Présentation des chevaux de l'étude

Cheval	Race	Sexe	Age (ans)	Activité	Poids (kg)
I	Trotteur Français	Hongre	5	Trot attelé	500
II	Trotteur Français	Femelle	3	Trot attelé	443
III	Trotteur Français	Femelle	3	Trot attelé	433
IV	Trotteur Français	Femelle	6	Trot attelé	500
V	Trotteur Français	Femelle	4	Trot attelé	418
VI	Trotteur Français	Femelle	4	Trot attelé	524
VII	Trotteur Français	Femelle	6	Trot attelé	482
VIII	Trotteur Français	Mâle	8	Trot attelé	516
IX	Trotteur Français	Hongre	8	Trot attelé	568
X	Trotteur Français	Femelle	5	Trot attelé	450
XI	Trotteur Français	Mâle	6	Trot attelé	490
XII	Trotteur Français	Mâle	4	Trot attelé	512

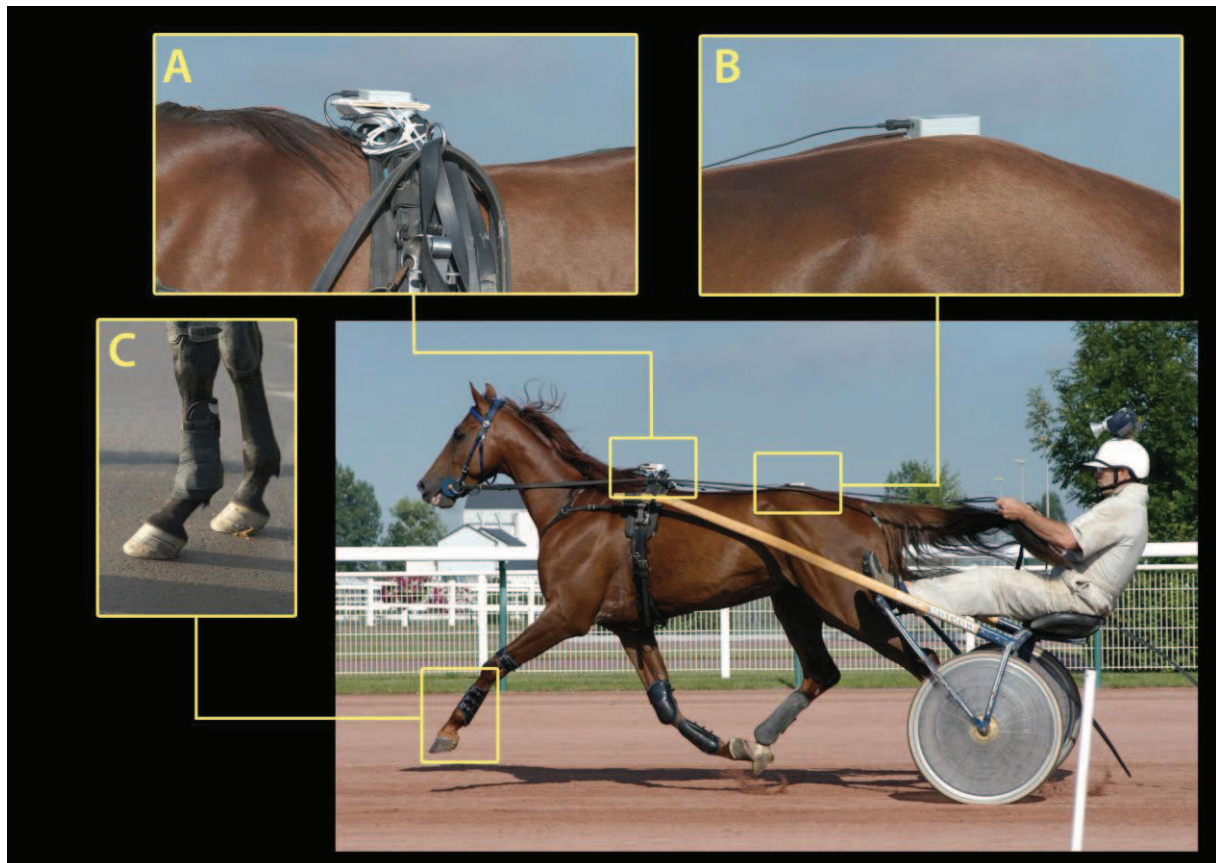
2. Les accéléromètres

Le système comprend trois appareils : trois DynaPort^{MiniMod} TriAcc (McRoberts ; The Hague, The Netherlands ; www.mcroberts.nl), qui intègrent chacun un accéléromètre 3D et l'électronique permettant la digitalisation du signal et le stockage sur carte mémoire (format SD). L'appareil enregistre sur une carte SD l'accélération dans les trois directions de l'espace, et cela à une fréquence d'acquisition de 100 Hz et avec une plage d'acquisition de +/- 10g. La digitalisation se faisant sur 8 bits, la précision des mesures est d'environ 0,05g. Deux MiniMod différents sont utilisés : le Lithium Polymer qui mesure 62x41x18 mm et pèse 53g, et le AAA qui mesure 64x62x13 mm et pèse 68g. Afin d'être synchronisés, les trois appareils sont démarrés simultanément ; pour cela, deux câbles les reliant sont installés au démarrage, et peuvent ensuite être retirés pour la séance d'enregistrement sur piste. Un démarrage simultané des trois appareils suffit à garder une bonne synchronisation ; en effet, sur une dizaine de milliers de données, le décalage entre deux MiniMod n'était que de 1 à 2 données.

Afin de pouvoir juger la symétrie locomotrice des membres antérieurs et postérieurs il a été choisi de placer les appareils sur la ligne du dos, à la verticale des membres. Le MiniMod antérieur (AAA) est positionné un peu plus caudalement, ce qui permet de le fixer directement sur le harnais. Le second MiniMod (Lithium Polymer) est fixé sur la croupe, juste en regard

du tuber sacrale, grâce à du ruban adhésif double face, la croupe ayant été préalablement tondue. Un troisième MiniMod (Lithium Polymer) est utilisé pour pouvoir latéraliser facilement le signal ; il est fixé sur une guêtre, qui est placée sur l'antérieur gauche. Cet accéléromètre permet de repérer la période de la foulée où le diagonal gauche est à l'appui. La deuxième guêtre formant la paire, non appareillée, est mise en place sur l'antérieur droit (Figure 13).

Figure 13 : Positionnement des 3 accéléromètres sur le trotteur



A - Sur le harnais ; B – Sur le tuber sacrale ; C – Sur le boulet antérieur gauche

3. La caméra

Un enregistrement vidéo de la locomotion du cheval est réalisé grâce à une caméra vidéo numérique standard (25Hz), embarquée dans une voiture qui suit le cheval de côté sur la piste intérieure de l'hippodrome.

B. Acquisition des données

1. Examen sur piste

Les chevaux sont examinés attelés, au trot à grande vitesse, dans les conditions d'entraînement habituelles, sur la piste de l'hippodrome de Cabourg.

Le système est installé sur le cheval au moment où ce dernier est attelé. Il est démarré avant l'entrée en piste, puis l'acquisition des données est continue jusqu'à la sortie de piste. Pendant toute la séance d'enregistrement, le cheval est filmé ; la caméra étant placée dans une voiture qui suit le cheval de côté, à l'intérieur de la piste. De plus, des informations précises sont notées, en fonction du temps, concernant les conditions d'examen du cheval : l'allure (pas, trot, traquenard, galop), l'orientation (corde à droite ou corde à gauche), la trajectoire (ligne droite ou virage) et la vitesse (vitesse approximative relevée sur le compteur de la voiture en ligne droite). Ces données permettent ensuite de définir les intervalles d'étude. L'enregistrement accélérométrique, l'enregistrement vidéo et un chronomètre sont synchronisés lors de leur démarrage, afin de coordonner l'ensemble des données.

2. Evaluation clinique de la locomotion du cheval

L'évaluation clinique est réalisée sur enregistrement vidéo par des vétérinaires spécialisés en pathologie locomotrice du cheval.

Les séquences vidéo analysées correspondent aux intervalles d'étude du signal accélérométrique présélectionnés. Ceci est rendu possible grâce à la synchronisation au démarrage de l'enregistrement vidéo et de l'enregistrement du signal accélérométrique. Les séquences vidéo découpées sont lues à vitesse normale et au ralenti. Les cliniciens déterminent si la locomotion est symétrique ou non. Si elle ne l'est pas, ils identifient le membre boiteux puis ils attribuent un grade de boiterie, selon une échelle de 1 à 5, telle que définie par Weishaupt *et al.* (2001).

3. Données cliniques du cheval

Les trotteurs de course de cette étude sont examinés au CIRALE par le Pr. DENOIX.

Lors de l'examen locomoteur au trot à grande vitesse sur piste, à l'hippodrome de Cabourg, les chevaux sont observés depuis le sulky par le Pr. DENOIX, et depuis la voiture qui suit le cheval de côté par les autres cliniciens. Ces diverses observations sont ensuite synthétisées pour formuler les données cliniques sur piste.

Puis, les chevaux sont transférés au CIRALE pour réaliser un examen locomoteur standard, au petit trot en main, et des examens complémentaires (radiographies, échographies, et éventuellement scintigraphie) afin d'établir un diagnostic lésionnel et proposer une gestion thérapeutique. Un compte-rendu médical regroupe l'ensemble de ces informations.

C. Récupération et traitement des données

1. Données cinématiques et indices de symétrie

a. Transfert des données : extraction du signal depuis les cartes mémoires

Après lecture, les données accélérométriques contenues dans les trois cartes SD sont importées dans le logiciel MatLab (The MathWorksTM ; Natick, Massachusetts, USA ; www.mathworks.com). Les données brutes enregistrées sont ensuite traitées dans le logiciel « LocoSym » développé avec l'aide des ingénieurs de l'UMR « Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval » de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.

b. Traitement des données accélérométriques à l'aide du logiciel
« LocoSym »

(1) Saisie des informations générales

La première opération est la saisie des informations générales concernant le cheval et les conditions de l'examen.

(2) Présélection des intervalles

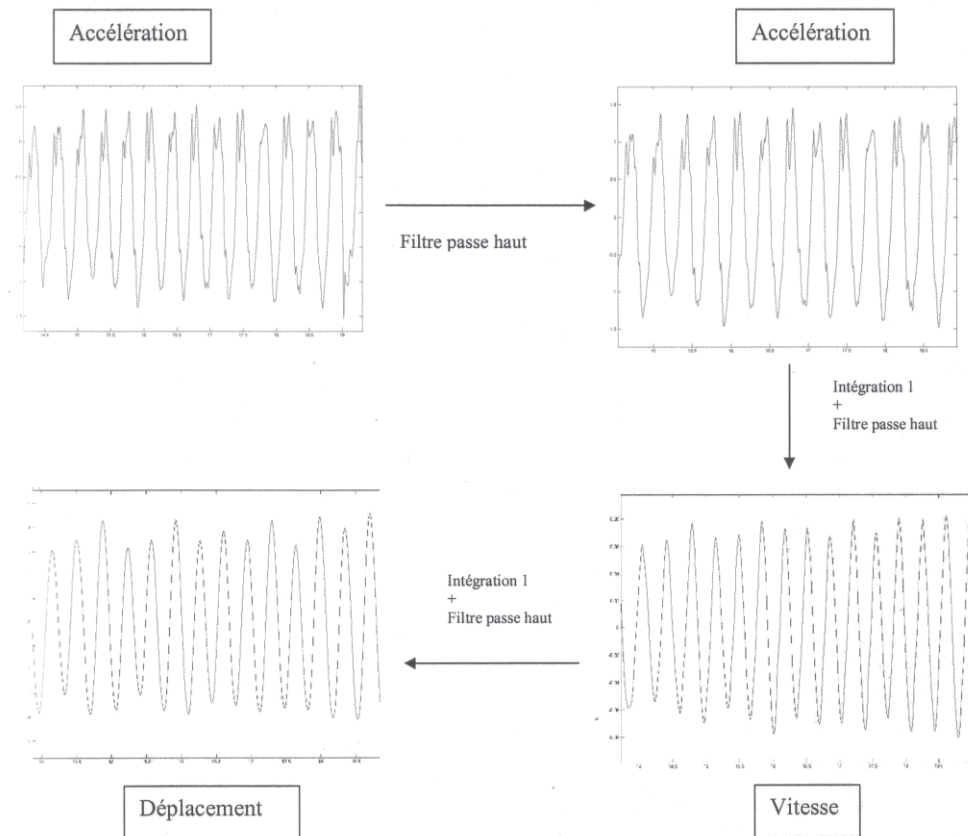
L'utilisateur sélectionne les intervalles qu'il souhaite étudier. Ce découpage est essentiel pour obtenir un intervalle d'étude homogène permettant une analyse fiable du signal accélérométrique. En effet, l'enregistrement étant réalisé en continu pendant tout l'examen sur piste, il comprend plusieurs intervalles de temps inexploitable (pas, demi-tour, accélération, décélération, etc...). De plus, le signal accélérométrique peut varier en fonction des conditions de course : l'orientation (corde à droite ou corde à gauche), la trajectoire (ligne droite ou virage), et la vitesse. C'est pourquoi l'ensemble de ces données est noté au cours de l'enregistrement afin de définir ensuite un intervalle d'étude homogène. Les intervalles sont traités séparément, et sont présentés par ordre chronologique. Pour chaque intervalle, les informations sont saisies par l'utilisateur (exemple : ligne droite, corde à gauche, à 45km/h) et seront ensuite restituées lors de la présentation des résultats. Une fois cette présélection établie, la liste des intervalles est stockée en mémoire et la fenêtre principale s'ouvre, affichant les signaux accélérométriques récupérés.

(3) Intégration du signal

Afin d'obtenir des résultats plus facilement interprétables pour les cliniciens, il est préférable de travailler sur les déplacements et non sur les accélérations. L'accélération correspond à la dérivée seconde du déplacement par rapport au temps, et à la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Ainsi, en intégrant deux fois le paramètre accélération, on en déduit le déplacement du capteur accélérométrique. L'intégration du signal est réalisée par la méthode des trapèzes. Cette méthode consiste à calculer l'aire d'un trapèze formé par deux points de la courbe et leur projection respective sur l'axe des abscisses, et de se déplacer de proche en proche afin d'obtenir une approximation de l'aire sous la courbe et donc de la valeur de l'intégrale.

Le processus d'intégration est associé à un filtrage du signal, afin de supprimer la partie constante du signal (accélération verticale due à la pesanteur) et tout artefact dont la fréquence est trop faible pour constituer un signal d'intérêt. Le signal est filtré avec un filtre passe haut, dont la fréquence de coupure est de 1Hz. De plus, l'intégration constitue une sorte de filtre puisque le bruit, de fréquence très élevée et de faible amplitude, est lissé par l'intégration. Ainsi, après deux processus de filtration (passe haut) et d'intégration, on récupère les valeurs du déplacement des capteurs accélérométriques placés sur le harnais et sur la croupe (Figure 14).

Figure 14 : Démarche conduisant du signal brut au déplacement par double intégration et filtrage



(4) Découpage des foulées successives et latéralisation du signal

La locomotion du cheval est définie par une succession de foulées, se répétant à intervalles réguliers. Il est donc préférable de travailler sur les foulées plutôt que sur le signal entier. Ainsi, les résultats sont présentés sous la forme d'un profil type de la foulée, avec des valeurs moyennes pour chaque paramètre calculé.

Le découpage des foulées doit répondre à certains impératifs : il doit être fiable, facile et rapide à exécuter. La solution retenue pour découper le signal accélérométrique est de repérer manuellement les premières foulées et d'extrapoler ensuite pour finir le découpage. Il s'agit d'une méthode semi-automatique, qui permet d'allier vitesse et contrôle par l'utilisateur.

La latéralisation du signal est permise grâce à l'utilisation d'un troisième accéléromètre placé sur l'antérieur gauche, qui permet de repérer de manière certaine la phase d'appui du diagonal gauche.

(5) Calculs des paramètres d'intérêt

- (a) Calculs d'indices de symétrie, basés sur la décomposition en série de Fourier

Le déplacement vertical des marqueurs se présente sous la forme d'une sinusoïde, à laquelle la décomposition en série de Fourier peut être appliquée. Un calcul des deux premières

harmoniques de la série de Fourier permet de déterminer un indice de symétrie global (Audigié *et al.*, 2002).

Pour chaque intervalle d'étude et pour chaque accéléromètre, l'analyse de Fourier est appliquée. Le déplacement vertical du dos en regard de chacun des deux accéléromètres peut être exprimé en fonction du temps :

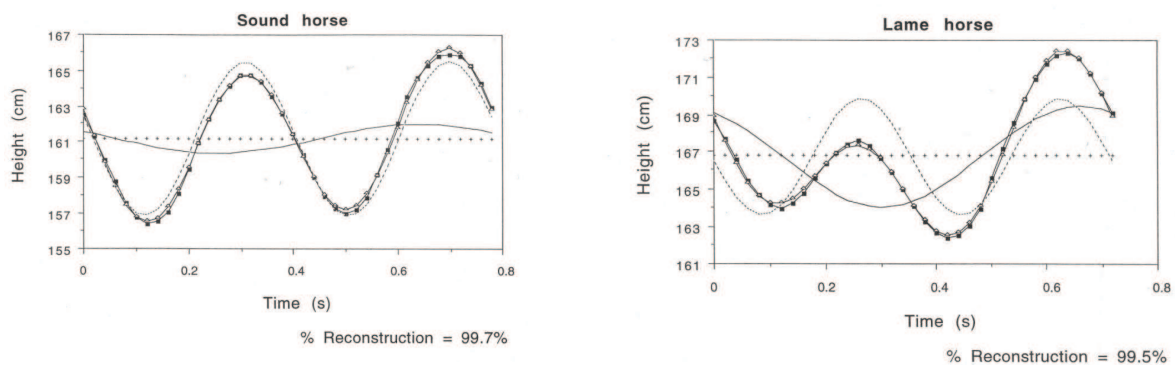
$$Z_F(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=2} A_i \cos\left(i \frac{2\pi}{T} t + \phi_i\right)$$

A_0 est la valeur moyenne du déplacement sur la période correspondant à une foulée (T)
 A_i et ϕ_i sont l'amplitude et le déphasage de l'harmonique i , respectivement.

Le déplacement vertical du dos peut être représenté seulement à l'aide de la première et de la seconde harmonique (Audigié *et al.*, 2002).

Sur le cheval au trot, le déplacement vertical de l'accéléromètre montre deux ondulations par foulée, une oscillation par appui de chaque diagonal (Figures 15 et 16). La 2^{ème} harmonique, constituée des éléments similaires de chaque oscillation verticale, représente la part symétrique du déplacement (se produisant 2 fois au sein d'une foulée). La 1^{ère} harmonique, constituée des éléments différents de chaque oscillation verticale représente la part asymétrique du déplacement. La période de la 2^{ème} harmonique est le double de celle de la 1^{ère}. Sur la figure 15, on peut observer les différences d'allures des harmoniques entre un cheval sain (a) et un cheval boiteux (b).

Figure 15 : Analyse de Fourier appliquée au déplacement vertical d'un marqueur de la ligne du dos sur une foulée de trot (Audigié *et al.*, 2002)



a) cheval sain

b) cheval boiteux

- Courbe en carrés noirs : déplacement vertical expérimental
- Courbe en croix : A_0 : valeur moyenne du déplacement
- Courbe continue : 1^{ère} harmonique
- Courbe discontinue : 2^{ème} harmonique
- Courbe en triangles : reconstruction à partir de A_0 et des 2 harmoniques.

L'Indice de Symétrie Global (ISG), ou le Ratio d'Énergie (ER_Z ; Audigié *et al.*, 2002), correspond au pourcentage que représente la 2^{ème} harmonique, calculé selon la formule suivante :

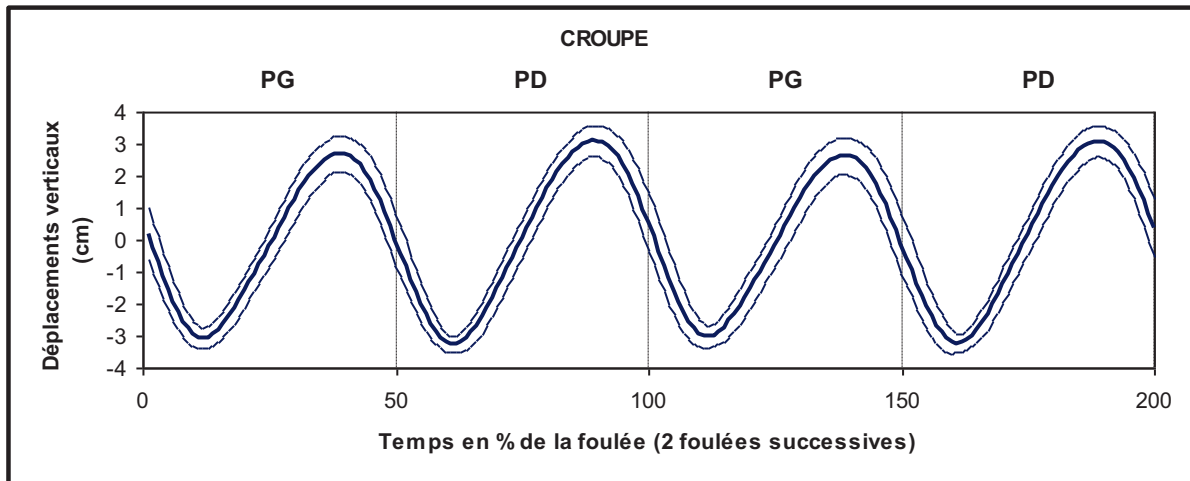
$$ISG = \frac{A_2^2}{A_1^2 + A_2^2} \times 100$$

Les valeurs de ce ratio sont comprises entre 0% et +100% ; la valeur de +100% correspondant à une symétrie parfaite.

Pour chaque intervalle d'étude et pour chaque accéléromètre, l'ISG est calculé à chaque foulée. On obtient ainsi une valeur moyenne de l'ISG +/- écart-type.

(b) Calcul des extremums de déplacement.

Figure 16 : Tracé du déplacement vertical de la croupe en fonction du temps, chez un cheval présentant une locomotion postérieure symétrique



Le déplacement vertical du dos en fonction du temps se présente sous la forme d'une sinusoïde comportant deux ondulations par foulée (Figure 16). Chaque foulée est donc subdivisée en 2 demi-foulées qui correspondent chacune à un diagonal différent. Chaque foulée contient 2 minimums et 2 maximums correspondant pour chaque appui diagonal à une descente du dos lors de l'amortissement puis à une remontée du dos lors de la propulsion.

Plusieurs paramètres peuvent être calculés. Le déplacement peut être caractérisé par une valeur maximale et une valeur minimale, dont on en déduit l'amplitude. On peut donc associer à chaque membre et à chaque foulée les valeurs maximum/minimum/amplitude qui lui correspondent, puis moyenniser ces valeurs sur l'ensemble de l'intervalle d'étude. En calculant le rapport entre les valeurs respectives de 2 membres controlatéraux, on obtient des indices de symétrie. Ainsi, on dispose de 6 indices de symétrie, basés sur le maximum, le minimum et l'amplitude de déplacement ; 3 pour les antérieurs, calculés sur le signal du garrot, et 3 pour les postérieurs, calculés sur le signal de la croupe (Tableau 4).

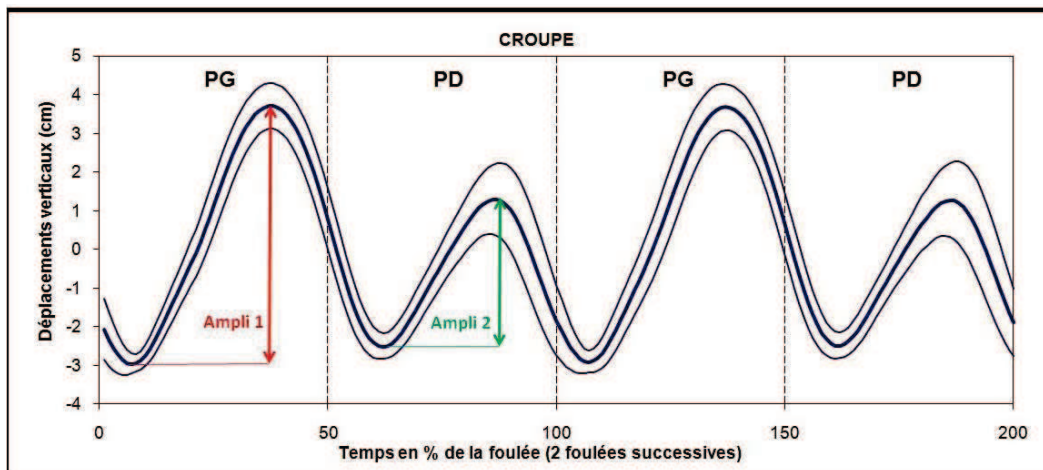
Tableau 4 : Données cinématiques correspondant au tracé ci-dessus (Figure 17)

Symétrie Postérieure	Postérieur Gauche		Postérieur Droit		% de symétrie
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
Maximum :	2,7	0,6	3,1	0,5	87
Minimum :	-3,1	0,3	-3,3	0,2	93
Amplitude :	5,8	0,8	6,4	0,6	90

Parmi les 3 indices de symétrie présentés ci-dessus (Tableau 4), le plus pertinent est l'Indice de Symétrie de l'Amplitude de propulsion, noté ISA, puisque, comme nous l'avons vu, l'amplitude de propulsion est un très bon indicateur de symétrie. C'est donc cet indice qui sera repris dans les tableaux de synthèse, avec l'ISG et l'ILat (voir ci-après).

(c) Identification du membre boiteux.

Figure 17 : Tracé du déplacement vertical de la croupe en fonction du temps, chez le même cheval, à grande vitesse (55km/h) : apparition d'une boiterie postérieure droite



Lorsque la locomotion du cheval est asymétrique, la courbe sinusoïdale présentant le déplacement vertical du dos en fonction du temps est modifiée (Figure 17). L'ondulation correspondant au membre boiteux peut être modifiée sur plusieurs paramètres : l'amplitude, la descente et/ou la remontée du dos sont diminuées. L'observation directe de la courbe permet de déterminer l'origine de l'asymétrie. De plus, afin de disposer d'un indice quantitatif pour déterminer le membre boiteux, un Indice de Latéralisation (ILat) est calculé selon la formule suivante :

$$ILat = \frac{\text{Amplitude moyenne AD (ou PD)}}{\text{Amplitude moyenne AG (ou PG)}} - 1 = \frac{\text{Ampli 2}}{\text{Ampli 1}}$$

Si $ILat > 0$, cela indique un soulagement AG ou PG

Si $ILat < 0$, cela indique un soulagement AD ou PD

L'Indice de Latéralisation est calculé systématiquement quelque soit le degré d'asymétrie ; néanmoins, il est surtout intéressant lors de boiterie à proprement parlée en permettant l'identification du membre boiteux.

(6) Présentation des résultats

Tous ces traitements sont déclenchés par l'utilisateur mais sont entièrement automatiques. Afin de simplifier l'utilisation et d'éviter tout risque d'erreur, l'utilisateur ne dispose que d'un seul bouton pour réaliser les opérations successives, dont l'action change au fur et à mesure du traitement. Ces étapes aboutissent finalement à la présentation des résultats sur une interface graphique rassemblant de manière synthétique toutes les informations (Figure 18). Pour un intervalle d'étude donné, une courbe moyenne représentant deux foulées successives est affichée pour les antérieurs et les postérieurs, ainsi qu'un tableau regroupant les calculs d'indices de symétrie. Cette page de synthèse correspond à un intervalle d'étude ; pour chaque cheval, 4 à 7 intervalles sont analysés indépendamment, ce qui constitue un total de 62 intervalles.

**Figure 18 : Présentation des résultats par intervalle d'étude et par cheval
(rapport fourni aux cliniciens)**

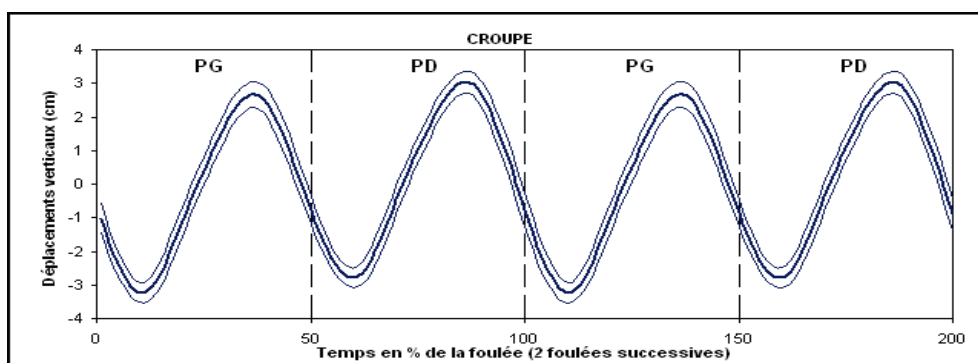
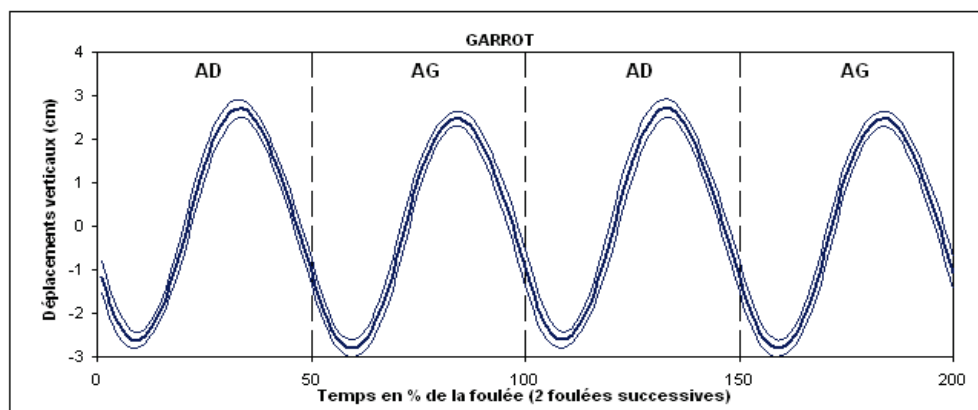
Nom : Cheval 12	N° de dossier : 07-0215
Race : TF	Date d'examen : 2007 04 04
Age : 4 ans	
Sexe : M	
Conditions d'examen : Examen locomoteur sur piste à Cabourg	

Intervalle d'étude	
Début : 00:09:09	(en s) : 549
Condition : Ligne droite (aller simple)	Terrain : piste Cabourg
Test Fonctionnel : Aucun	Vitesse : 30 km/h
Commentaires : Corde à droite	

IS Global (%)	Antérieurs		Postérieurs	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
	98	0	97	2

Symétrie Antérieure	Antérieur Droit		Antérieur Gauche		% de symétrie	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
	Maximum :	2,7	0,2	2,5	0,2	91
	Minimum :	-2,6	0,2	-2,8	0,2	93
	Amplitude :	5,4	0,3	5,3	0,3	99

Symétrie Postérieure	Postérieur Gauche		Postérieur Droit		% de symétrie	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type		
	Maximum :	2,7	0,4	3,1	0,3	87
	Minimum :	-3,2	0,3	-2,8	0,3	86
	Amplitude :	5,9	0,6	5,9	0,4	99



2. Evaluation clinique de la locomotion du cheval.

La lecture des vidéos correspondantes à chaque intervalle d'étude est réalisée par le Pr. J-M DENOIX, avec l'aide du Dr. F AUDIGIE, Dr. D CARNICER et Dr. M SEIGNOUR, spécialisés en pathologie locomotrice du cheval. Les données issues de l'évaluation clinique comprennent le grade et la latéralisation de l'asymétrie observée, à la fois pour les antérieurs et les postérieurs. Lorsque la locomotion est symétrique, le grade 0 est attribué ; sinon, la boiterie est graduée sur une échelle de 1 à 5 (Weishaupt *et al.*, 2001). Pour synthétiser ces données, un grade de boiterie clinique latéralisé est calculé à partir du grade de boiterie clinique, selon la formule :

- grade multiplié par 1 lors d'un soulagement AG (ou PG),
- grade multiplié par (-1) lors d'un soulagement AD (ou PD).

Si le clinicien considère que la qualité de la vidéo ne permet pas de réaliser une bonne évaluation clinique de la locomotion du cheval, alors l'intervalle correspondant est classé « Non Interprétable » et il est exclu de l'analyse statistique.

3. Analyse statistique.

L'analyse statistique permet de confronter les résultats obtenus par la méthode accélérométrique de quantification des boiteries à ceux fournis par l'évaluation clinique, qui servent alors de référentiel. L'objectif de l'analyse statistique est de vérifier la correspondance des résultats d'une part sur la gradation et d'autre part sur la latéralisation de l'asymétrie.

L'ensemble des données, fournies par la méthode accélérométrique et par l'évaluation clinique, sont regroupées dans un tableau. Toutes les données sont classées en fonction du grade de boiterie clinique, attribué par le clinicien, pour les antérieurs d'une part, et pour les postérieurs d'autre part. Pour chaque grade de boiterie clinique sont calculés la moyenne et l'intervalle de confiance à 95%, de l'ISG d'une part et de l'ISA d'autre part.

Puis, pour comparer les indices de symétrie et de latéralisation issus de la méthode accélérométrique à l'évaluation clinique, on calcule l'indice de corrélation r et on détermine graphiquement la fonction reliant les différents paramètres :

- ISG et ISA en fonction du grade de boiterie clinique,
- ILat en fonction du grade de boiterie clinique latéralisé.

Pour chaque fonction, l'ensemble des données est représenté graphiquement par un nuage de points, puis, la droite de régression correspondante est tracée. La régression est testée par un test F de Fischer, et la pente de la droite est testée par un test de Student.

De même, la corrélation entre les deux indices de symétrie, l'ISG et l'ISA, est vérifiée, pour les antérieurs et les postérieurs.

De plus, la sensibilité de la méthode accélérométrique est calculée en comparant la latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique à celle fournie par l'évaluation clinique.

III. RESULTATS

Afin d'illustrer les capacités de la méthode accélérométrique, nous présentons, dans un premier temps, une analyse descriptive détaillée des 12 cas cliniques inclus. Puis, dans un second temps, une analyse globale permettra d'étudier statistiquement la corrélation entre le système accélérométrique et l'évaluation clinique sur vidéo des intervalles correspondants.

A. Présentation des cas cliniques et des résultats cinématiques associés.

Les manifestations cliniques observées sur la piste à l'aide du système accélérométrique sont variées, et peuvent être regroupées en différentes catégories. Parmi les 12 chevaux examinés, tous ont présenté une asymétrie postérieure. Un regroupement par type de boiterie postérieure a donc été réalisé.

Pour chaque cheval, nous présentons :

- les données cinématiques fournies par le système accélérométrique,
- les données cliniques par intervalle, issues de l'évaluation rétrospective sur vidéo,
- les données cliniques par cheval, issues de l'observation directe sur la piste, récoltées le jour même de l'examen locomoteur standard sur piste,
- le bilan lésionnel établi.

1. Boiterie postérieure se manifestant uniquement à grande vitesse

Plusieurs chevaux de cette étude présentaient une locomotion symétrique au petit trot d'échauffement puis la boiterie postérieure apparaissait lorsque la vitesse augmentait. La méthode accélérométrique permet de quantifier de manière objective ce phénomène.

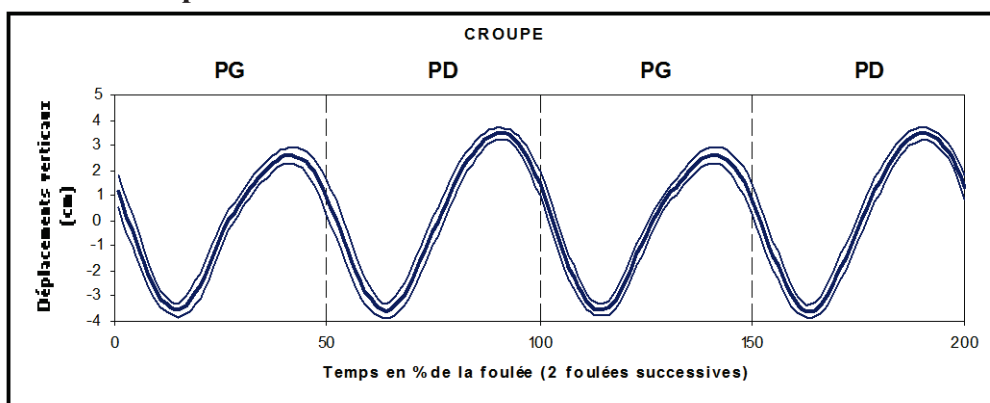
a. Cheval VIII

- *Analyse cinématique :*

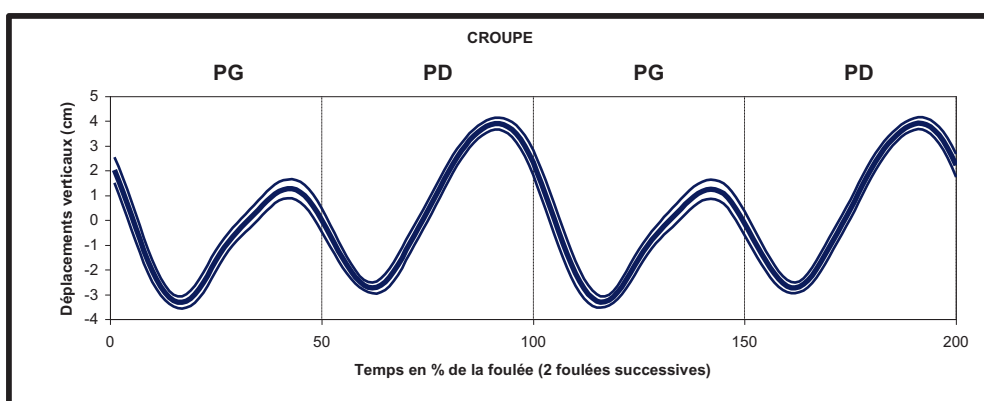
Le cheval VIII a présenté les tracés cinématiques ci-dessous (Figure 20), sur lesquels on observe qu'une asymétrie postérieure apparaît lorsque la vitesse du cheval est supérieure à 40km/h. On note même une évolution parallèle entre la vitesse du cheval et le degré d'asymétrie : plus le cheval accélère, plus l'asymétrie s'aggrave.

Figure 19 (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval VIII, présentés à vitesse croissante

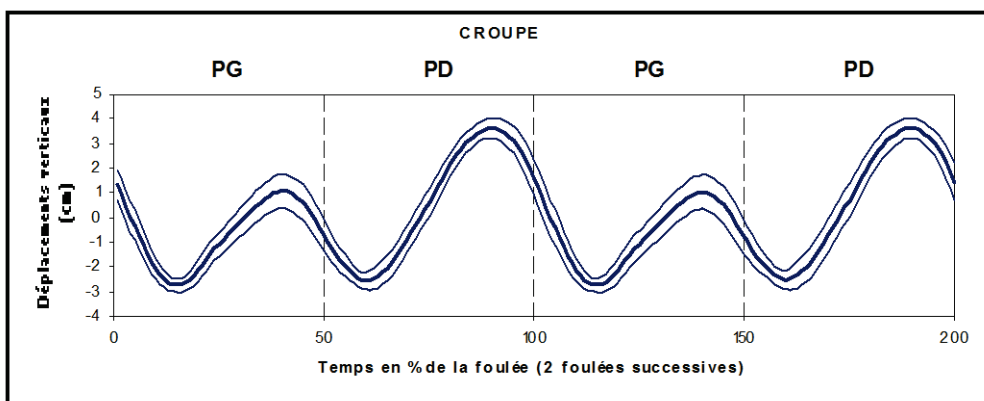
A 30km/h



B 40km/h



C 50km/h



Nous voyons sur la figure 19 qu'une boiterie postérieure gauche apparaît et s'aggrave progressivement avec l'augmentation de la vitesse. L'ISG postérieur passe de 96% à 30km/h (A) à 76% à 40km/h (B) et 72% à 50km/h (vitesse maximale atteinte sur le pied de l'14) (C). La boiterie postérieure gauche se manifeste par un défaut substantiel d'amplitude de propulsion : la propulsion postérieure gauche a une amplitude de 3,9cm, permettant à la croupe d'atteindre une hauteur maximale de 1,1cm ; tandis la propulsion postérieure droite a une amplitude de 6,3cm, permettant à la croupe d'atteindre une hauteur maximale de 3,7cm (Courbe C).

- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

L'analyse clinique vidéo confirme les résultats ci-dessus (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Sur la piste, les cliniciens ont également observé un soulagement postérieur gauche, plus marqué dans les virages corde à droite et au trot à grande vitesse, où il se mettait au traquenard.

- Bilan lésionnel :

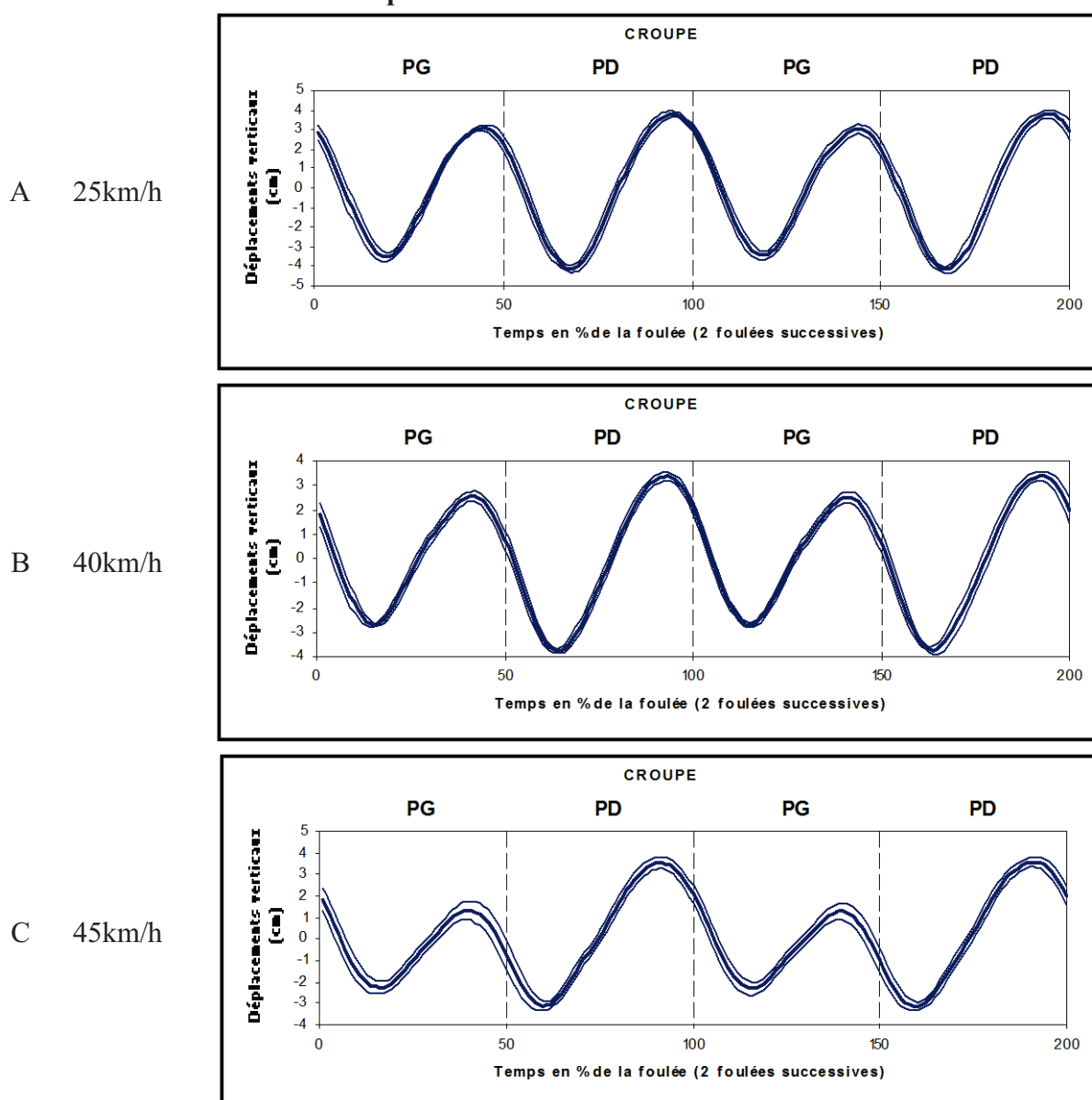
Chez ce cheval, une contusion osseuse de la phalange proximale du postérieur gauche était suspectée radiographiquement.

b. Cheval II

- Analyse cinématique :

De même que pour le cheval VIII, le tracé cinématique du cheval II (Figure 20) a révélé une boiterie postérieure gauche, qui apparaît à vitesse moyenne (ISG = 93% à 40km/h) et s'aggrave quand la vitesse augmente (ISG = 74% à 45km/h).

Figure 20 (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval II, présentés à vitesse croissante



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :
L'analyse clinique vidéo confirme l'analyse cinématique (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :
Sur piste, les cliniciens ont observé une boiterie postérieure gauche s'aggravant avec la vitesse.

- Bilan lésionnel :
Cette pouliche présentait, sur le boulet postérieur gauche, un collapsus marqué du condyle métatarsien médial.

2. Boiteries postérieures se manifestant uniquement en fin de travail

Quelques chevaux de l'étude ont présenté une boiterie postérieure apparaissant seulement en fin de travail, lors de la récupération au petit trot.

a. Cheval IX

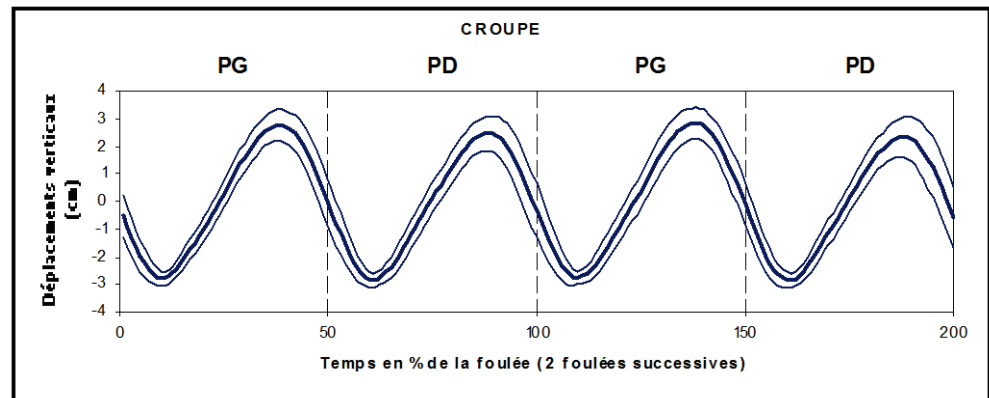
- Analyse cinématique :

Pour ce cheval, les tracés cinématiques ont montré une boiterie postérieure droite intermittente à grande vitesse, et une boiterie postérieure gauche apparaissant lors de la récupération, à petite vitesse (Figure 21).

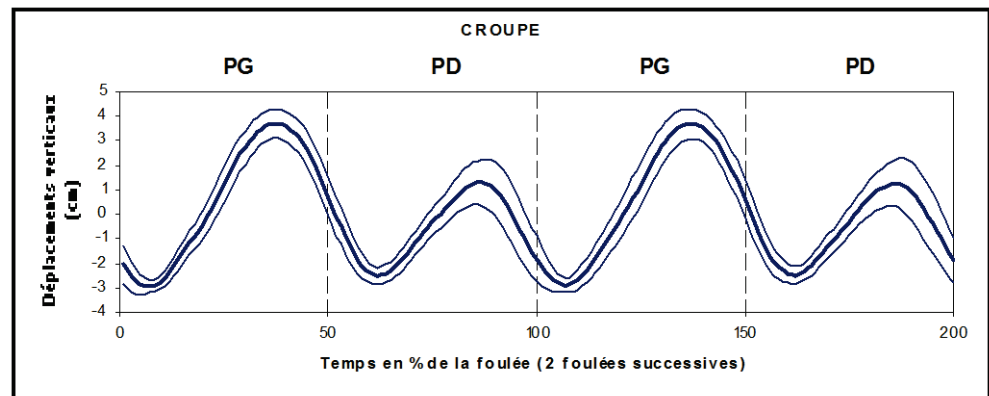
Figure 21 : (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval IX

- Courbe A : locomotion postérieure proche de la symétrie (ISG = 92% ; ISA = 93%) à 50km/h (IX₃)
- Courbe B : boiterie postérieure droite (ISG = 76%) à 55km/h (IX₄)
- Courbe C : boiterie postérieure gauche (ISG = 84%) à 25km/h (IX₅)

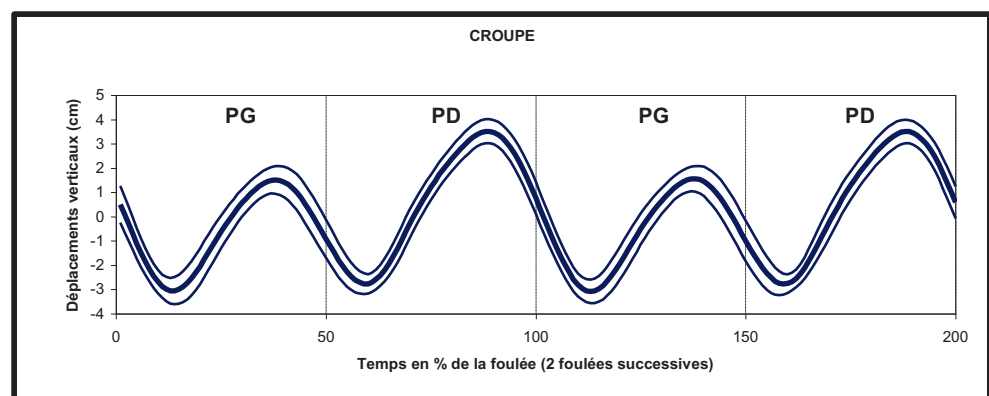
A 50km/h



B 55km/h



C 25km/h



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

Les résultats cinématiques ci-dessus ne sont pas tous validés par l'évaluation clinique sur vidéo, qui confirme les résultats de l'intervalle IX₃ mais contredit ceux de l'intervalle IX₄ (observation d'une boiterie postérieure gauche de grade 0,5/5 ; Tableau 5). Malheureusement, les vidéos correspondantes à ce cheval sont globalement de mauvaise qualité, avec 2 vidéos /5 jugées non interprétables, y compris la IX₅.

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

A la piste, les cliniciens ont observé un soulagement postérieur droit à grande vitesse et dans les virages corde à droite.

- Bilan lésionnel :

Le bilan lésionnel de ce cheval révéla principalement des lésions axiales modérées, en région cervicale basse, sacro-iliaque, et thoraco-lombaire.

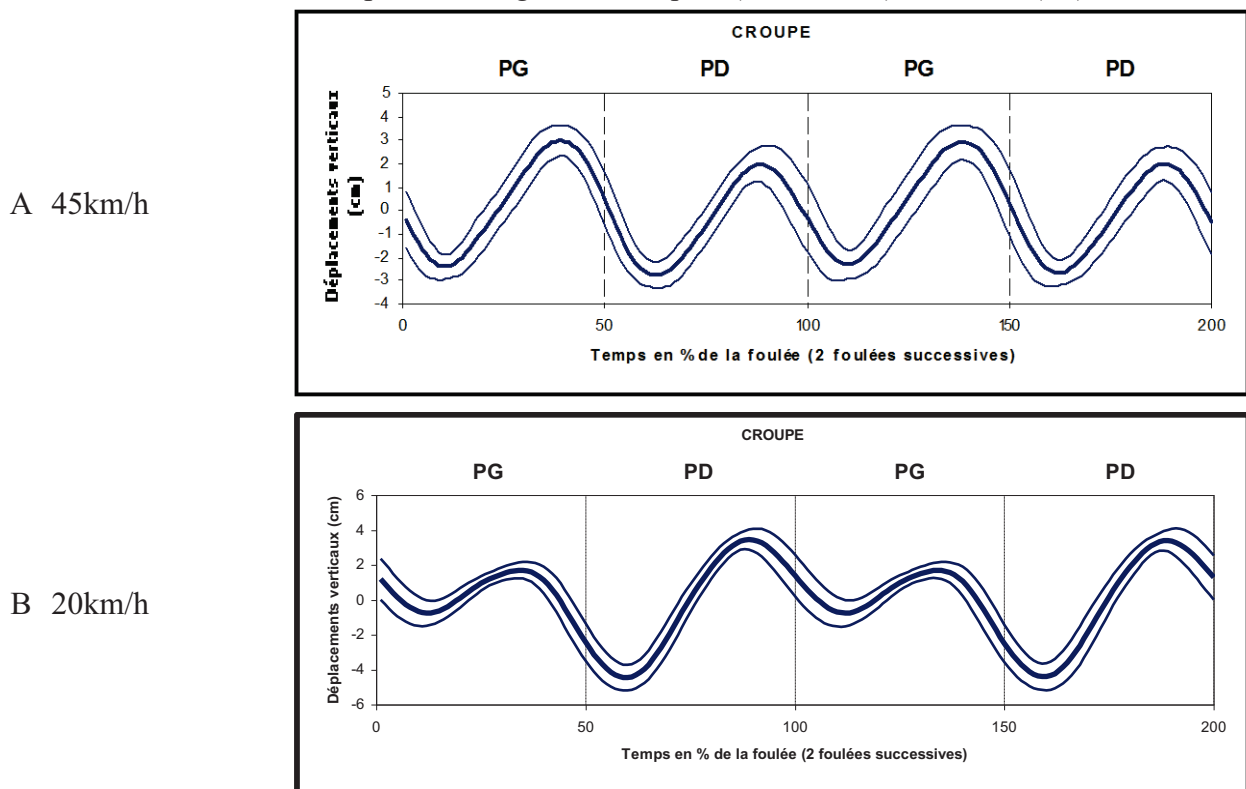
b. Cheval X

- Analyse cinématique :

L'analyse quantitative a mis en évidence un soulagement postérieur droit modéré à grande vitesse, et une boiterie postérieure gauche, apparaissant en fin de travail à grande vitesse et s'aggravant nettement lors de la récupération à petite vitesse (Figure 22).

Figure 22 : (A,B,C) : Tracés des déplacements verticaux de la croupe du cheval X

- Courbe A : soulagement postérieur droit (ISG = 87%) à 45km/h (X₃)
- Courbe B : boiterie postérieure gauche marquée (ISG = 64%) à 20km/h (X₅)



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

L'analyse clinique a confirmé le résultat X₃ mais pas le résultat X₅ (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Les cliniciens concluent à une boiterie postérieure gauche, de grade 3/5, à chaud et à petite allure ; le soulagement postérieur droit à grande vitesse n'a pas été évoqué.

- Bilan lésionnel :

Le bilan lésionnel a révélé, sur le postérieur gauche, une tendinopathie chronique marquée du tendon fléchisseur profond du doigt, depuis le 1/3 distal du métatarse jusqu'au creux du paturon. La jument présentait aussi, sur le boulet postérieur droit, une activité osseuse globalement augmentée à l'examen scintigraphique.

3. Boiterie postérieure bilatérale alternée

Plusieurs chevaux de l'étude présentaient une locomotion postérieure irrégulière, avec alternance dans le temps d'une boiterie postérieure droite et d'une boiterie postérieure gauche.

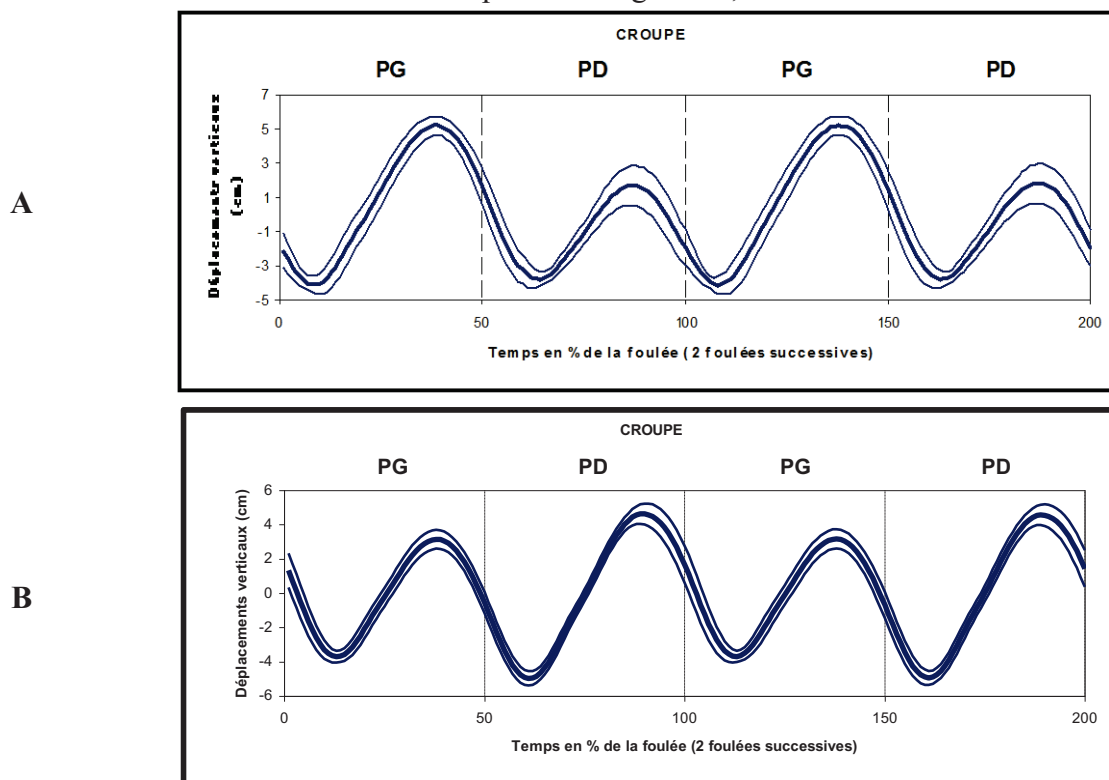
a. Cheval VII

- Analyse cinématique :

Les résultats cinématiques du cheval VII ont révélé une asymétrie postérieure sur tous les intervalles étudiés. Le cheval soulageait alternativement chaque postérieur (Figures 23), le soulagement postérieur droit étant plus fréquent et plus marqué que le soulagement postérieur gauche.

Figure 23 : Tracés des déplacement verticaux de la croupe du cheval VII, à vitesse constante (45 km/h) :

- A : sur l'intervalle 3 : boiterie postérieure droite ; ISG = 74%,
- B : sur l'intervalle 4 : boiterie postérieure gauche ; ISG = 92%.



Par ailleurs, l'analyse cinématique a également révélé un soulagement antérieur droit permanent, plus marqué lorsqu'il est associé à un soulagement postérieur gauche.

- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

L'alternance de la boiterie postérieure et le soulagement antérieur droit sont vérifiés par l'évaluation clinique sur vidéo (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Par contre, lors de l'examen sur piste, les cliniciens ont mis en évidence uniquement une boiterie postérieure gauche quasi-permanente (80%), avec un port de tête à droite.

- Bilan lésionnel :

La jument présentait, sur le jarret gauche, une desmopathie sévère du faisceau court du ligament collatéral latéral et une synovite modérée de l'articulation cruro-tarsienne, et, en région lombo-sacrée, une fracture de la fosse vertébrale de L6 avec une discopathie lombo-sacrée.

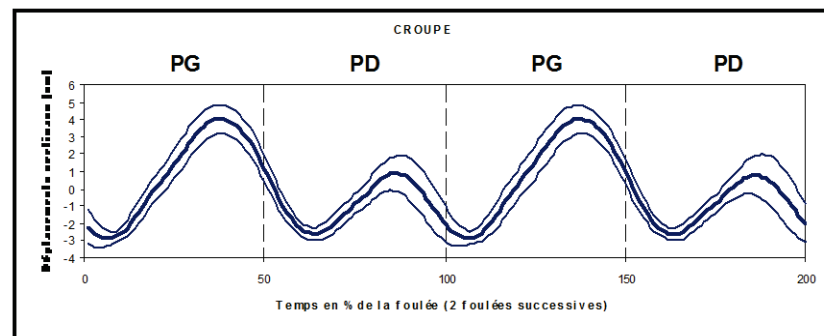
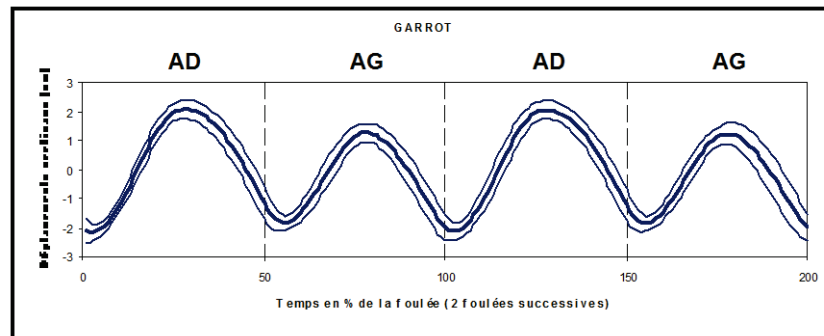
b. Cheval XI

- Analyse cinématique :

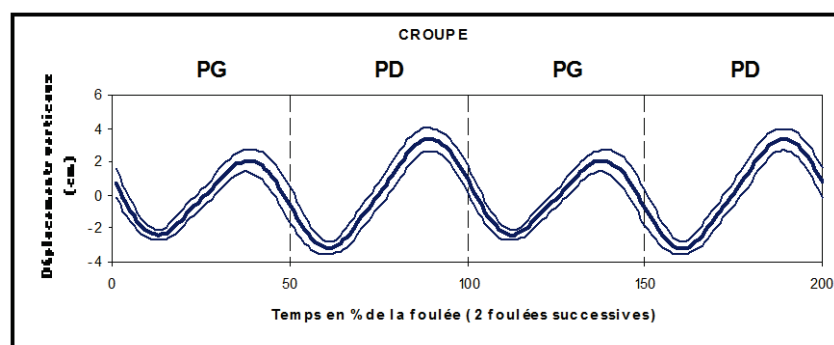
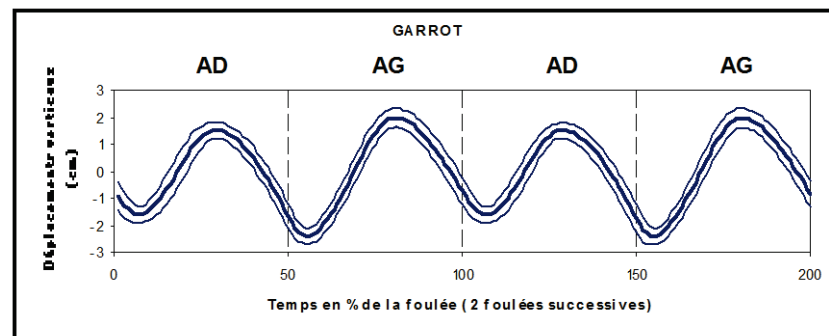
De même, les résultats cinématiques ont révélé que le cheval XI soulageait alternativement le postérieur droit ou le postérieur gauche, le soulagement postérieur droit étant plus fréquent. Une asymétrie antérieure alternée a également été observée ; celle-ci variait en fonction de la boiterie postérieure. Le soulagement postérieur droit était accompagné d'un soulagement antérieur gauche ; et le soulagement postérieur gauche était accompagné d'un soulagement antérieur droit (Figure 24).

Figure 24 : Tracés des déplacement verticaux du garrot et de la croupe du cheval XI :
 - A : intervalle 5 à 50km/h : boiterie postérieure droite et soulagement antérieur gauche,
 - B : sur l'intervalle 6 à 55km/h : boiterie postérieure gauche et soulagement antérieur droit.

A



B



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :
 Les observations ci-dessus n'ont pas été confirmées par l'évaluation clinique sur vidéo (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Pourtant, sur la piste, les cliniciens avaient observé un soulagement postérieur gauche, aggravé à vitesse moyenne et amélioré à vitesse élevée et en ligne droit, avec de plus une phase de soulagement postérieur droit.

- Bilan lésionnel :

Les investigations lésionnelles par imagerie ont mis en évidence une arthropathie sacro-iliaque bilatérale et, sur les deux grassets, une synovite fémoro-tibiale modérée.

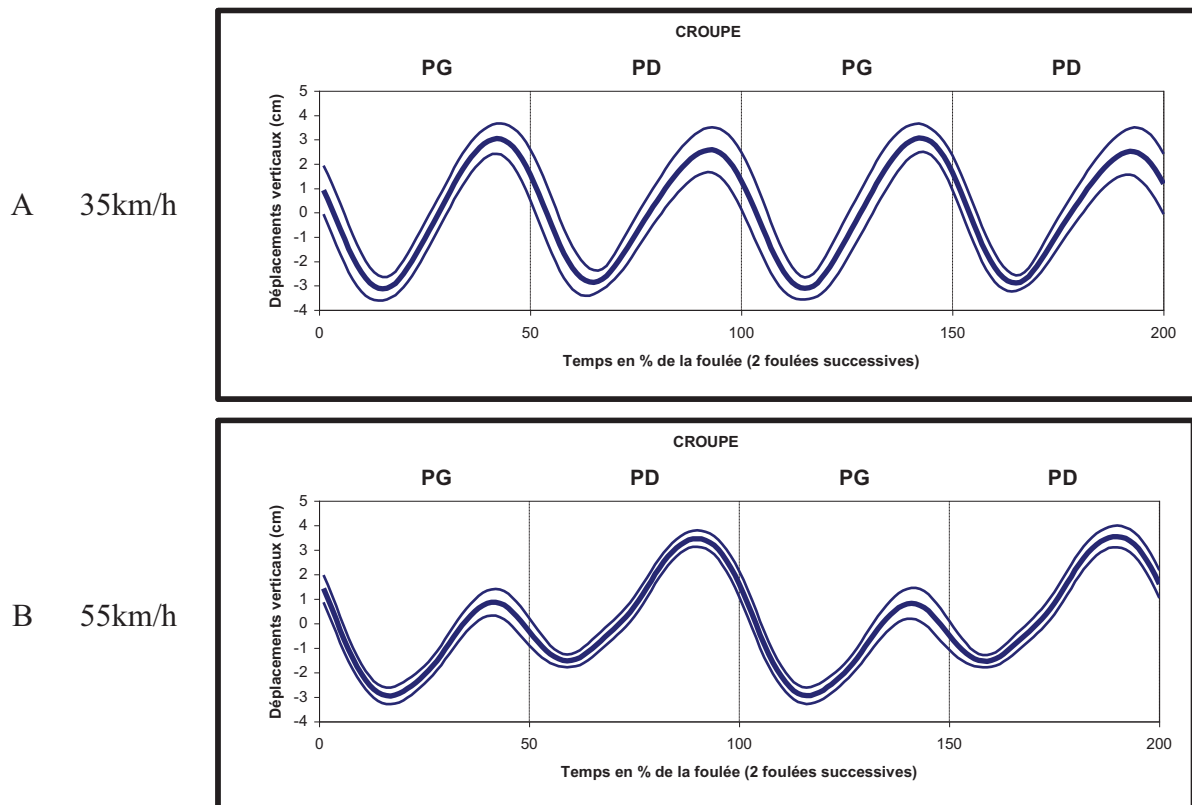
c. Cheval I

- Analyse cinématique :

Les résultats cinématiques ont mis en évidence un discret soulagement postérieur droit, avec un soulagement antérieur gauche, à vitesse moyenne, et un soulagement postérieur gauche à grande vitesse (Figure 25).

Figure 25 (A,B) : Comparaison des tracés du déplacement vertical de la croupe du cheval I, au petit trot (A) et au trot à grande vitesse (B)

- Courbe A : discret soulagement postérieur droit (ISG = 92%) à 35km/h (I₂)
- Courbe B : soulagement postérieur gauche (ISG = 55%) à 55km/h (I₄)



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

L'analyse clinique vidéo n'a confirmé que partiellement ces résultats (absence de corrélation pour I₄) (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Néanmoins, sur piste, les cliniciens avaient constaté que le cheval I présentait un soulagement postérieur droit et antérieur gauche en alternance avec un soulagement postérieur gauche, et qu'il se mettait au traquenard à grande vitesse.

- Bilan lésionnel :

Le bilan lésionnel comprenait des lésions axiales modérées, en région cervicale haute et basse et en région thoraco-lombaire ; une synovite chronique substantielle des deux grassets ; et, sur le jarret droit, une sclérose osseuse de la gorge médiale de la cochlée tibiale et une desmite du fascia métatarsien plantaire, avec une anesthésie métatarsienne plantaire latérale proximale positive à 75%.

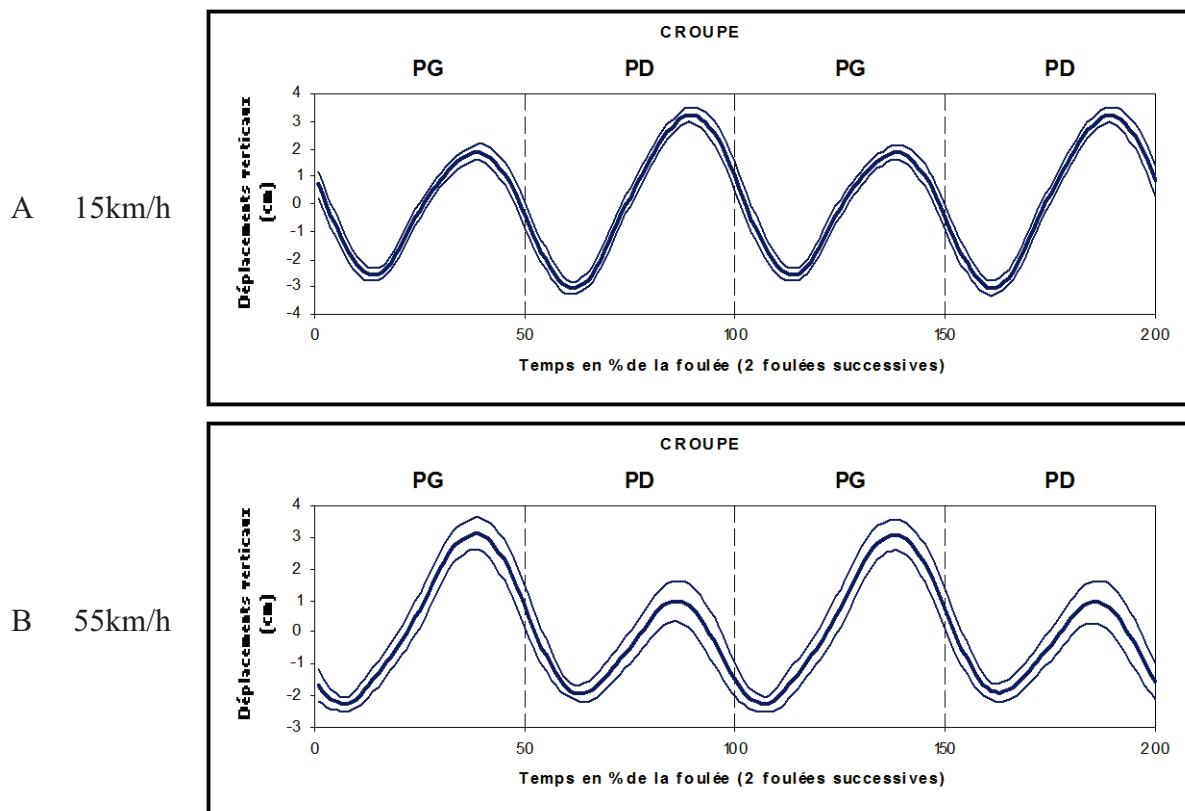
d. Cheval IV

- Analyse cinématique :

L'analyse quantitative a mis en évidence une boiterie postérieure gauche à petite vitesse et une boiterie postérieure droite intermittente à grande vitesse (Figure 26).

Figure 26 : (A,B) : Tracés du déplacement vertical de la croupe du cheval IV, au petit trot (A) et au trot à grande vitesse (B)

- Courbe A : soulagement postérieur gauche modéré (ISG = 92%) à 15km/h (IV₁)
- Courbe B : soulagement postérieur droit marqué (ISG = 71%) à 55km/h (IV₅)



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

Les résultats ci-dessus n'ont pas été confirmés par l'évaluation clinique sur vidéo (Tableau 5).

- *Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :*

Pourtant, lors de l'examen sur piste, les cliniciens avaient également observé un soulagement du postérieur gauche et un soulagement postérieur droit intermittent à grande vitesse, avec un défaut de mobilité lombo-sacrale et un défaut de propulsion.

- *Bilan lésionnel :*

La jument présentait une ankylose lombo-sacrale, et, sur les deux jarrets, une sclérose de l'os central du tarse et de l'os tarsal III.

4. Boiterie postérieure associée à une asymétrie antérieure

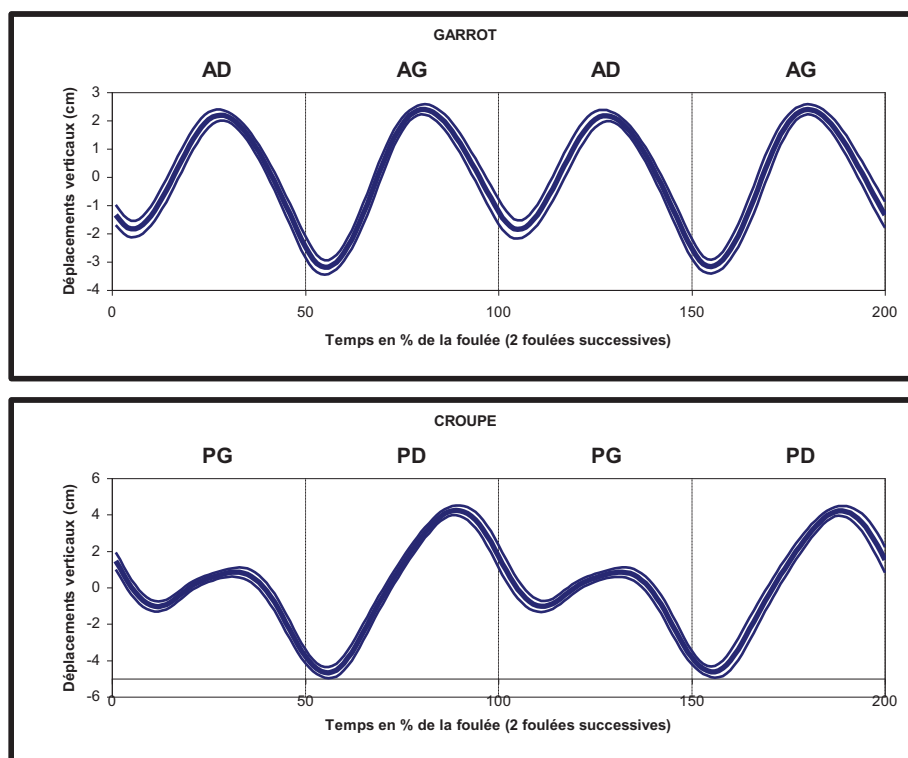
L'observation d'une asymétrie antérieure associée à une boiterie postérieure est un phénomène constaté chez plusieurs chevaux de cette étude.

a. Cheval VI

- *Analyse cinématique :*

L'analyse quantitative a montré que le cheval VI présentait une boiterie postérieure gauche marquée constante (ISG = 48%) et un soulagement antérieur droit (ISG = 90%) (Figure 27).

Figure 27 : Tracés des déplacements verticaux du garrot et de la croupe du cheval VI se déplaçant au trot à 40 km/h



L'asymétrie antérieure se caractérise ici par un défaut de descente du garrot : la hauteur minimale du garrot est atteinte à -1,9 cm lors de l'appui antérieur droit et à -3,2 cm lors de l'appui antérieur gauche.

- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

Ces deux asymétries, antérieure et postérieure, ont été confirmées par l'évaluation clinique sur vidéo (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

Sur la piste, les cliniciens avaient relevé une boiterie postérieure gauche de grade 2 à 3/5 dans toutes les circonstances de l'examen.

- Bilan lésionnel :

Cette jument présentait une arthropathie fémoro-tibiale médiale sévère avec une dégénérescence complète du cartilage articulaire du condyle fémoral médial, une synovite chronique et un prolapsus du ménisque médial. La reconversion de la jument en poulinière fût recommandée.

b. Cheval V

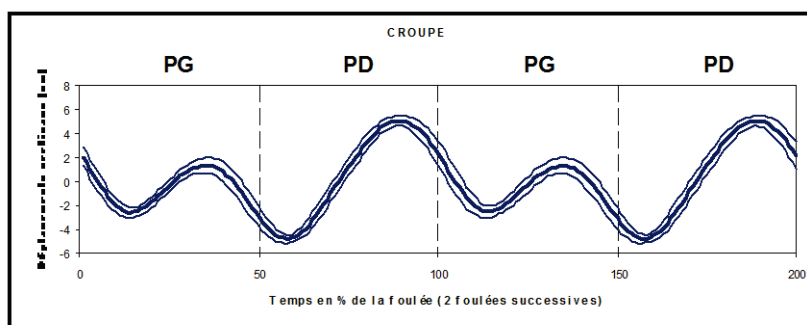
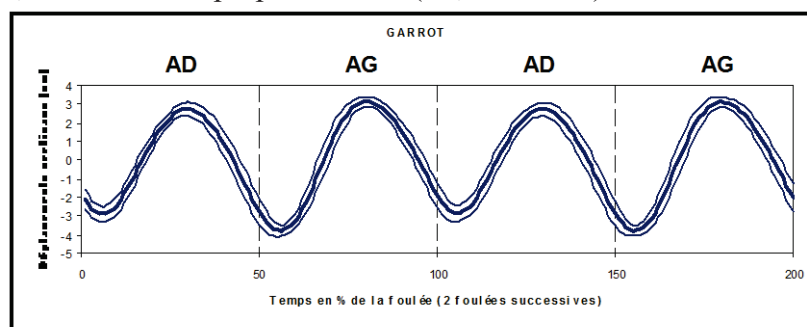
- Analyse cinématique :

Les résultats cinématiques ont révélé une boiterie postérieure gauche, s'aggravant avec la vitesse, et un soulagement antérieur droit (Figure 28).

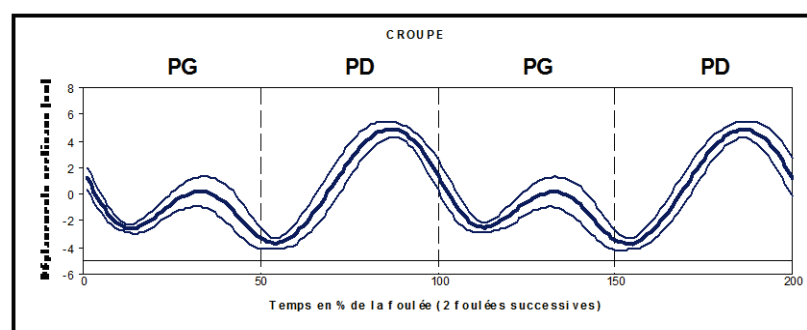
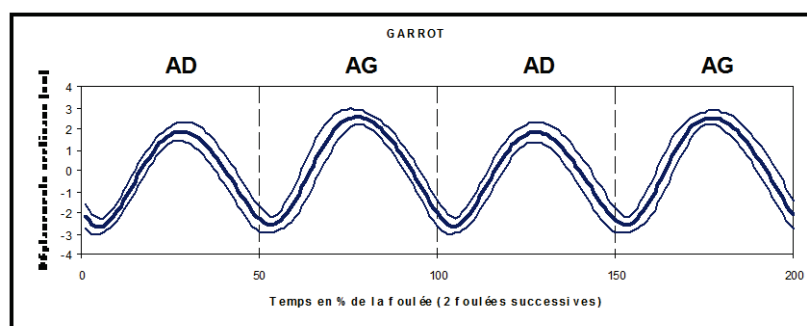
Figure 28 : Déplacement vertical du garrot et de la croupe du cheval V présentant une boiterie postérieure gauche et un soulagement antérieur droit, caractérisé par :

- A : défaut de descente du garrot lors de l'appui antérieur droit : -2,9cm lors de l'appui AG versus -3,9cm lors de l'appui AG (V₂, à 35km/h)
- B : défaut de montée du garrot lors de la propulsion de l'antérieur droit : +1,8cm lors de la propulsion AD versus +2,6cm lors de la propulsion AG (V₄, à 45km/h)

A



B



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :
L'analyse clinique vidéo a confirmé les résultats ci-dessus (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :
L'évaluation clinique sur piste a également confirmé les résultats ci-dessus.

- Bilan lésionnel :

Chez cette jument, une contusion osseuse de l'étage distal du tarse gauche a été suspectée ; l'activité osseuse était fortement augmentée en regard de l'articulation tarso-métatarsienne, et les anesthésies cruro-tarsienne et tarso-métatarsienne amélioraient la locomotion de la jument à 95%.

c. Cheval XII

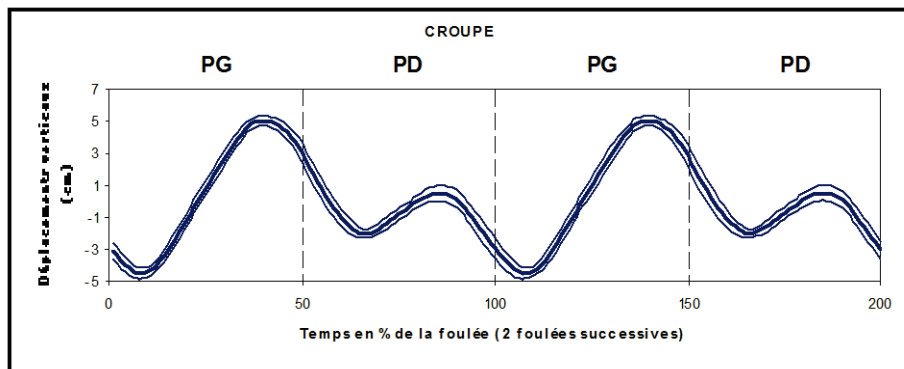
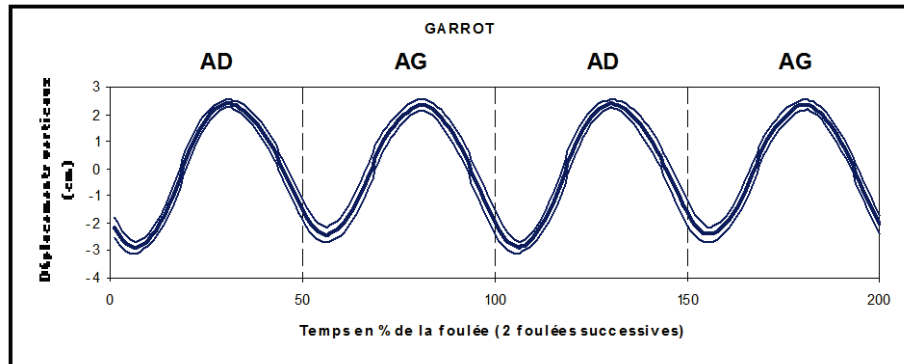
- Analyse cinématique :

Les tracés cinématiques du cheval XII ont montré une boiterie postérieure droite, qui apparaissait à vitesse moyenne, et persistait à grande vitesse avec un soulagement antérieur gauche associé (Figure 29).

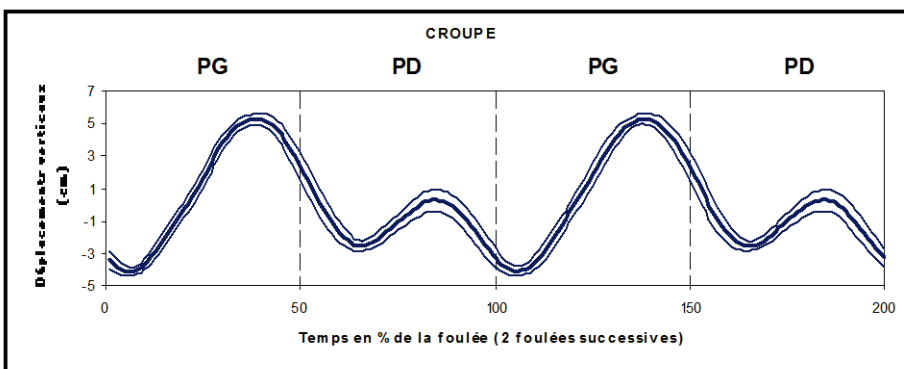
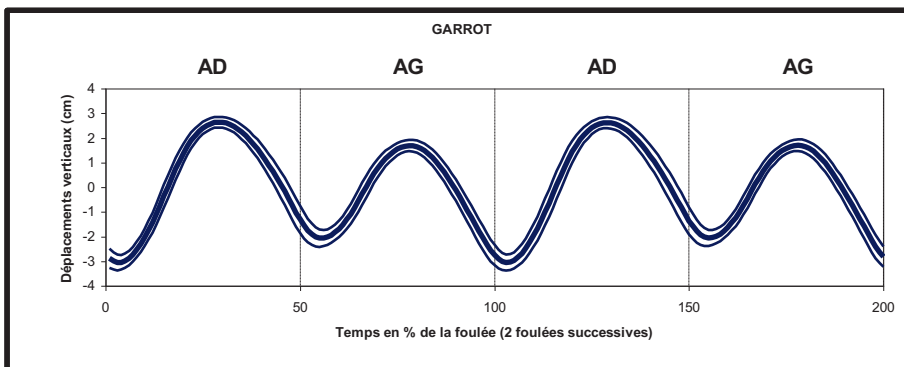
Figure 29 : Tracés des déplacement verticaux du garrot et de la croupe du cheval XII, présentant une boiterie postérieure droite et :

- A : une locomotion antérieure symétrique à 40km/h (ISG = 98%) (XII₃),
- B : un soulèvement antérieur gauche à 45km/h (ISG = 90%) (XII₄).

A



B



- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :
L'analyse clinique vidéo a confirmé les résultats ci-dessus (Tableau 5).

- Evaluation clinique le jour de l'examen locomoteur sur piste :

A l'examen sur piste et sur tapis roulant à grande vitesse, les cliniciens ont observé une boiterie postérieure droite, de grade 2/5, avec une anesthésie métatarsienne distale partiellement positive sur ce membre.

- Bilan lésionnel :

Ce cheval présentait une discopathie lombaire marquée en L5 et, sur le boulet postérieur droit, une zone d'ostéolyse en partie parasagittale plantaro-distale du condyle métatarsien, avec une fibrose du ligament plantaire.

5. Autres cas : cheval III

- Analyse cinématique :

L'analyse cinématique a révélé un soulagement postérieur gauche modéré, constant.

- Analyse clinique vidéo des intervalles correspondants :

L'analyse clinique vidéo a confirmé le résultat ci-dessus (Tableau 5).

- Evaluation clinique lors de l'examen locomoteur sur piste :

Les cliniciens ont conclu que la jument présentait une locomotion globalement satisfaisante dans toutes les circonstances de l'examen.

- Bilan lésionnel :

Le bilan lésionnel n'a révélé aucune anomalie significative.

6. Conclusion

Les différents cas cliniques présentés ci-dessus illustrent donc bien l'application de la méthode accélérométrique comme outil diagnostique complémentaire à l'examen clinique traditionnel. Il est maintenant essentiel d'analyser statistiquement la corrélation entre le système accélérométrique et l'évaluation clinique vidéo des intervalles correspondants.

B. Confrontation des résultats obtenus selon les 2 méthodes d'analyse : méthode accélérométrique de quantification des boiteries et évaluation clinique sur vidéo.

L'annexe 1 A et B regroupe les données cinématiques et les indices de symétrie issus de la méthode accélérométrique de quantification des boiteries, pour les antérieurs (A) et les postérieurs (B).

Le tableau 5 présente la synthèse des résultats fournis par les 2 méthodes d'analyse :

- Méthode accélérométrique de quantification des boiteries permettant le calcul d'indices de symétrie : ISG et ISA, et la latéralisation de l'asymétrie.
- Evaluation clinique de la locomotion du cheval par intervalle, réalisée à posteriori sur vidéo, avec attribution d'un grade d'asymétrie et identification du membre boiteux.

Tableau 5 (A) : Synthèse des résultats fournis par la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique (1/2)

Cheval	Intervalles d'étude		Indices de symétrie								Evaluation clinique			
	Ordre	Vitesse (km/h)	Antérieurs				Postérieurs				Antérieurs		Postérieurs	
			ISG (%)		ISA (%)	Lat	ISG (%)		ISA (%)	Lat	Grade asymétrie	Lat	Grade asymétrie	Lat
			Moy	Et			Moy	Et						
I	1	30	93	3	78	AG	98	1	90	PD	1,5	AG	1,5	PD
	2	35	94	5	78	AG	92	8	89	PD	1	AG	1	PD
	3	60	93	3	90	AD	89	5	99	S	0		0	
	4	55	86	4	70	AG	55	16	70	PG	0		0	
II	1	25	97	1	82	AD	96	2	81	PG	2	AD	1	PG
	2	40	97	1	86	AD	93	2	72	PG	2	AD	NI	
	3	45	98	1	94	AD	74	10	54	PG	1	AD	0	
	4	50	98	0	93	AG	96	3	86	PG	0		1	PG
	5	55	98	1	95	AG	85	5	62	PG	0		1,5	PG
III	1	30	95	4	85	AD	90	5	69	PG	NI		2	PG
	2	40	91	5	99	AG	85	10	71	PG	NI		1,5	PG
	4	45	92	4	97	AD	91	4	72	PG	0,5	AG	1	PG
	6	50	94	4	93	AD	94	5	92	PG	0,5	AG	1	PG
IV	1	15	98	1	88	AD	92	5	71	PG	1	AG	1	PG
	2	25	96	2	83	AD	95	2	76	PG	NI		NI	
	3	30	98	1	97	AD	86	6	69	PD	0,5	AG	0	
	4	40	98	1	90	AD	95	3	95	PD	0		0	
	5	55	94	5	85	AD	71	17	53	PD	0		0	
V	1	25	97	2	84	AD	70	7	44	PG	2	AD	3	PG
	2	35	95	4	81	AD	64	12	40	PG	1	AD	3	PG
	3	40	97	2	90	AD	49	15	32	PG	1	AG	2,5	PG
	4	45	94	6	86	AD	49	18	32	PG	1	AD	3	PG
VI	1	20	95	2	78	AD	72	6	42	PG	1	AD	1	PG
	2	20	93	3	74	AD	80	6	51	PG	2	AD	2	PG
	3	30	97	1	86	AD	61	5	32	PG	0		2	PG
	4	40	90	4	72	AD	48	7	21	PG	1	AD	3	PG
	5	40	80	8	73	AD	36	8	14	PG	NI		3	PG
	6	45	88	6	99	AG	34	5	14	PG	1	AD	3	PG
	7	45	85	12	86	AD	16	6	4	PG	2	AD	3,5	PG
VII	1	25	93	2	71	AD	97	1	86	PG	1	AD	1	PG
	2	45	97	2	93	AD	83	12	72	PD	1	AG	2	PD
	3	50	97	2	93	AD	74	19	60	PD	0,5	AG	2	PD
	4	45	87	3	64	AD	92	6	72	PG	2	AD	2,5	PG
	5	55	93	7	86	AD	85	14	75	PD	1	AD	2	PD
	6	25	91	2	67	AD	92	3	69	PG	1	AD	0,5	PG
VIII	1	35	97	1	92	AD	96	2	87	PG	1	AD	0	
	2	40	96	2	81	AD	76	8	68	PG	1	AD	0	
	3	50	96	2	84	AD	75	14	76	PG	1	AD	1	PG
	4	50	96	3	87	AD	72	15	61	PG	NI		1	PG

Tableau 5 (B) : Synthèse des résultats fournis par la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique (2/2)

Cheval	Intervalles d'étude		Indices de symétrie								Evaluation clinique			
	Ordre	Vitesse (km/h)	Antérieurs				Postérieurs				Antérieurs		Postérieurs	
			ISG (%)		ISA (%)	Lat	ISG (%)		ISA (%)	Lat	Grade asymétrie	Lat	Grade asymétrie	Lat
			Moy	Et			Moy	Et						
IX	1	25	96	2	94	AG	92	5	91	PD	1	AG	0	
	2	50	97	3	89	AD	96	4	90	PG	NI		NI	
	3	50	93	5	91	AD	92	10	93	PD	0		0	
	4	55	93	5	97	AD	76	19	57	PD	0,5	AG	0,5	PG
	5	25	94	3	84	AD	84	10	74	PG	NI		NI	
X	1	25	98	1	99	S	96	2	88	PG	1	AG	1	PD
	2	40	98	1	98	S	92	5	94	PD	1	AG	2	PD
	3	45	96	3	97	AD	87	11	90	PD	1	AG	2	PD
	4	45	95	4	91	AD	84	12	90	PG	NI		NI	
	5	20	93	6	76	AD	64	18	33	PG	1	AG	1	PD
XI	1	25	86	6	60	AD	82	10	61	PG	2	AD	2	PG
	2	25	85	5	59	AD	85	5	63	PG	2	AD	2	PG
	3	50	93	6	93	AD	89	15	84	PD	1	AD	1	PG
	4	50	90	7	84	AG	71	15	57	PD	1	AD	0	
	5	50	88	10	75	AG	63	23	50	PD	1	AD	0	
	6	54	90	5	72	AD	89	9	69	PG	0		0	
	7	25	96	2	87	AD	96	4	85	PG	1	AD	1	PD
XII	1	30	98	0	99	AG	97	2	99	S	1	AD	0	
	2	35	98	0	94	AG	54	12	31	PD	1	AG	1	PD
	3	40	98	1	90	AG	49	9	27	PD	1	AG	2,5	PD
	4	45	90	5	66	AG	47	11	31	PD	1	AG	3	PD
	5	50	78	8	52	AG	42	14	31	PD	1	AG	2	PD
	6	25	97	1	97	AD	95	3	87	PG	1	AG	1	PD

1. Latéralisation de l'asymétrie locomotrice

La sensibilité de la méthode accélérométrique est calculée en comparant la latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique, nommée « Latéralisation Cinématique », à celle fournie par l'évaluation clinique sur vidéo, nommée « Latéralisation Clinique » (Tableaux 6 et 7). Cette comparaison a été réalisée pour tous les intervalles sur lesquels la locomotion du cheval est considérée asymétrique par le clinicien.

Tableau 6 : Latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique, pour les antérieurs

		Latéralisation Clinique		
		AD	AG	Total
Latéralisation Cinématique	AD	21	11	32
	AG	4	7	11
Total		25	18	43

$$Se_{ant} = \frac{28}{43} = 65\%$$

Sur les 43 boiteries antérieures relevées par le clinicien, 28 ont été correctement identifiées par la méthode accélérométrique, d'où une sensibilité d'évaluation des boiteries antérieures de 65%.

Tableau 7 : Latéralisation de la boiterie obtenue par la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique, pour les postérieurs

		Latéralisation Clinique		
		PD	PG	Total
Latéralisation Cinématique	PD	11	2	13
	PG	4	26	30
Total		15	28	43

$$Se_{post} = \frac{37}{43} = 86\%$$

Sur les 43 boiteries postérieures relevées par le clinicien, 37 ont été correctement identifiées par la méthode accélérométrique, d'où une sensibilité d'évaluation des boiteries postérieures de 86%.

2. Gradation de l'asymétrie locomotrice

Toutes les données ont été classées en fonction du grade de boiterie attribué par le clinicien, pour les antérieurs d'une part et pour les postérieurs d'autre part. Pour chaque grade de boiterie clinique, noté GC, sont calculés la moyenne, l'écart-type et l'intervalle de confiance à 95%, pour l'ISG, l'ISA et l'ILat (Annexe 2).

La bonne corrélation entre les deux indices de symétrie, ISG et ISA, a tout d'abord été recherchée, pour les antérieurs (Figure 30) et les postérieurs (Figure 31). Ces courbes démontrent que ces deux indices sont fortement corrélés.

La corrélation entre les indices ISG, ISA et ILat, et le grade de boiterie clinique, est ensuite évaluée, pour les antérieurs (Figures 32 à 34) et les postérieurs (Figures 35 à 37) :

- tracé de l'ISG en fonction du grade de boiterie clinique,
- tracé de l'ISA en fonction du grade de boiterie clinique,
- tracé de l'ILat en fonction du grade de boiterie clinique latéralisé.

Figure 30 : Tracé de l'ISG en fonction de l'ISA pour les Antérieurs

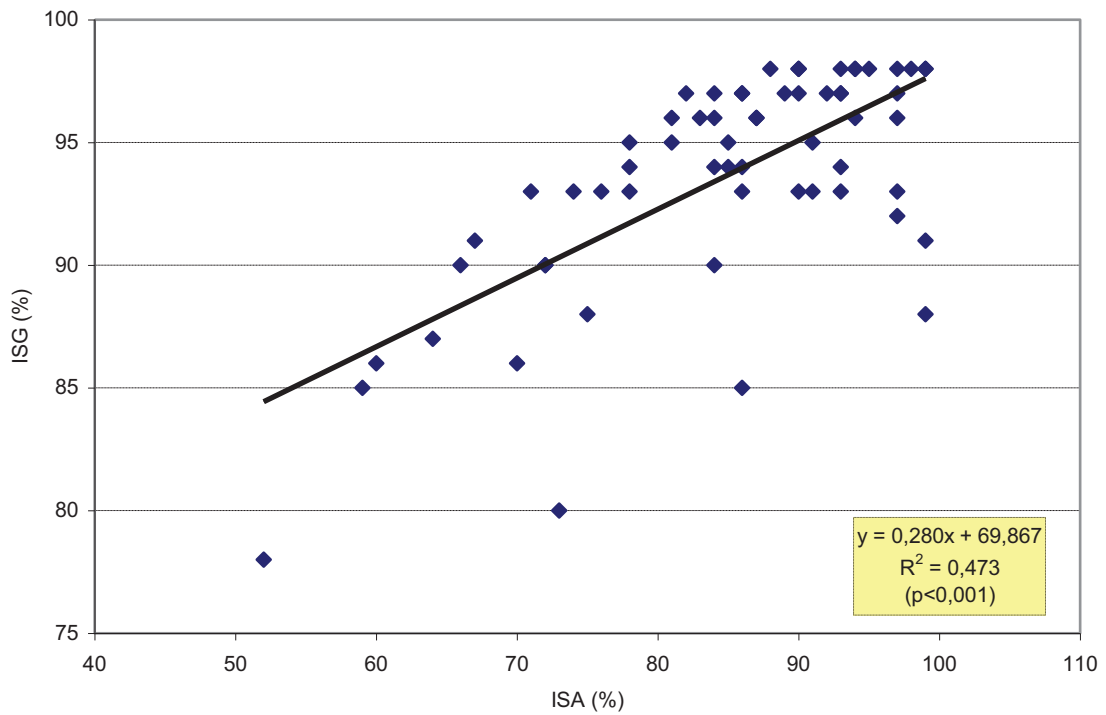


Figure 31 : Tracé de l'ISG en fonction de l'ISA pour les Postérieurs

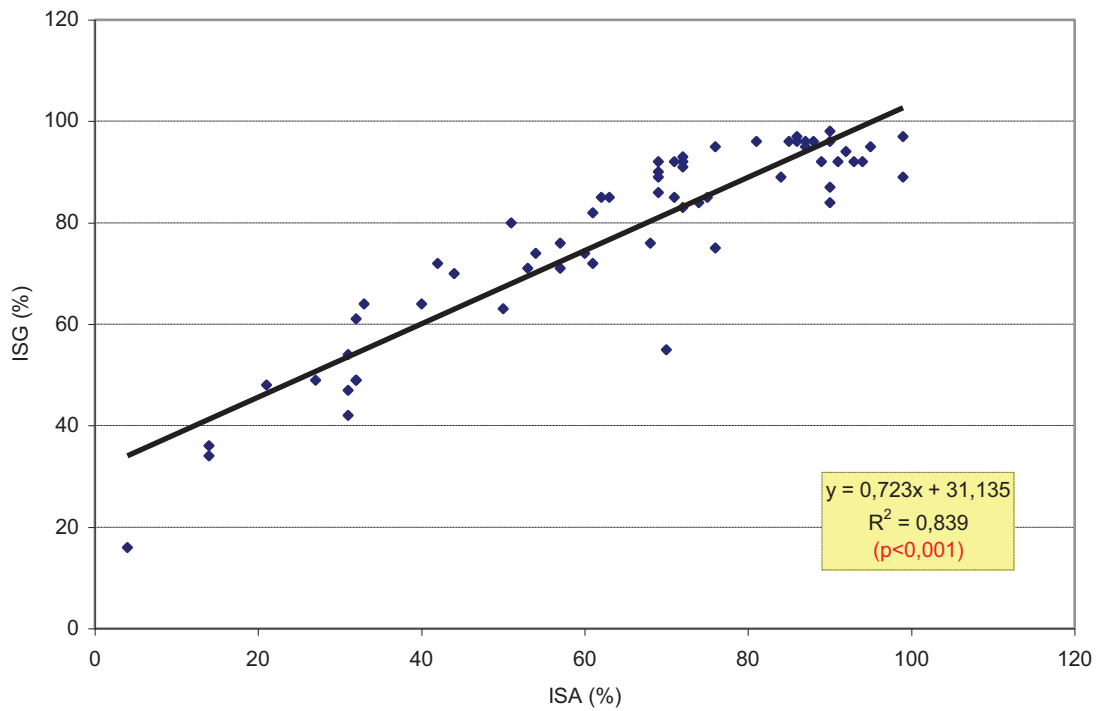


Figure 32 : Tracé de l'ISG en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Antérieurs

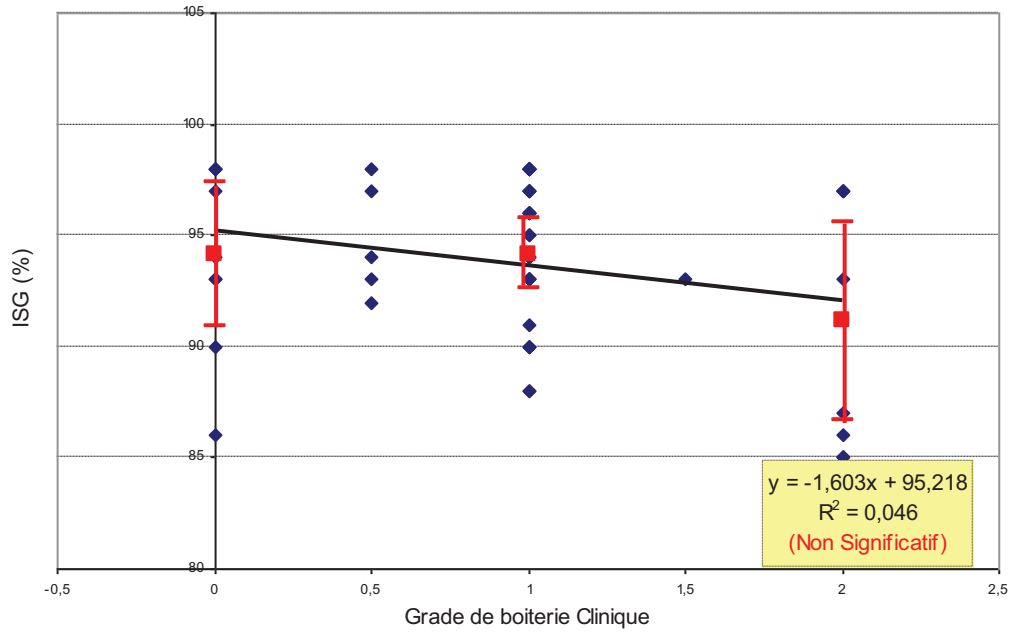


Figure 33 : Tracé de l'ISA en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Antérieurs

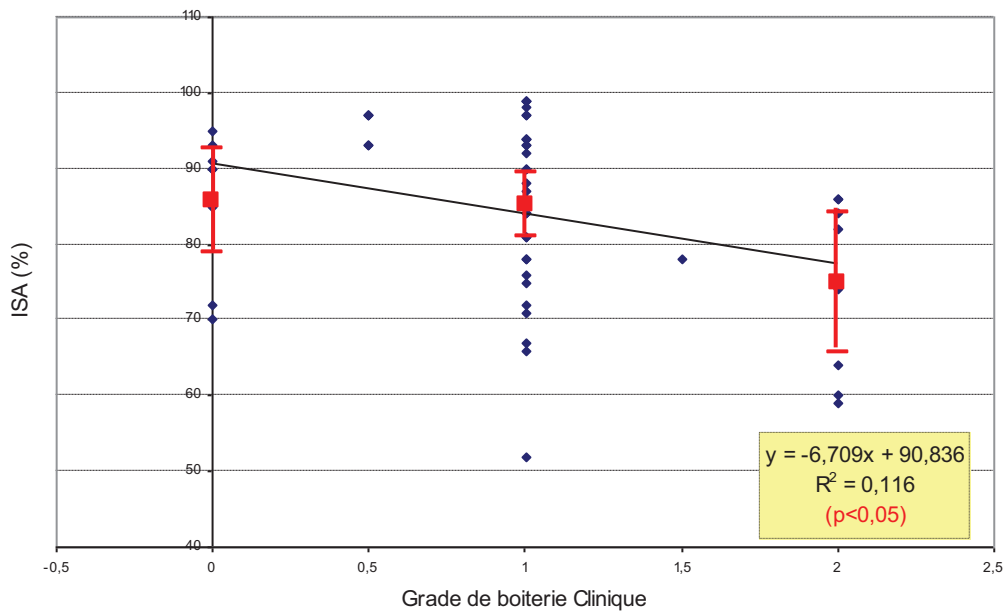


Figure 34 : Tracé de l'ILat en fonction du Grade de boiterie Clinique Latéralisé, pour les Antérieurs

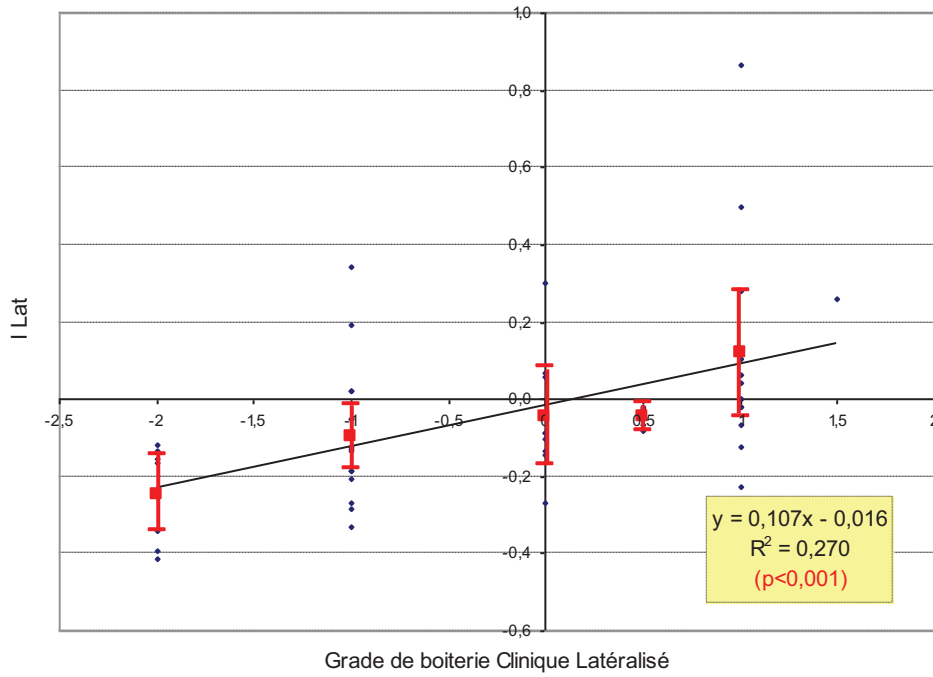


Figure 35 : Tracé de l'ILat en fonction du Grade de boiterie Clinique Latéralisé, pour les Postérieurs

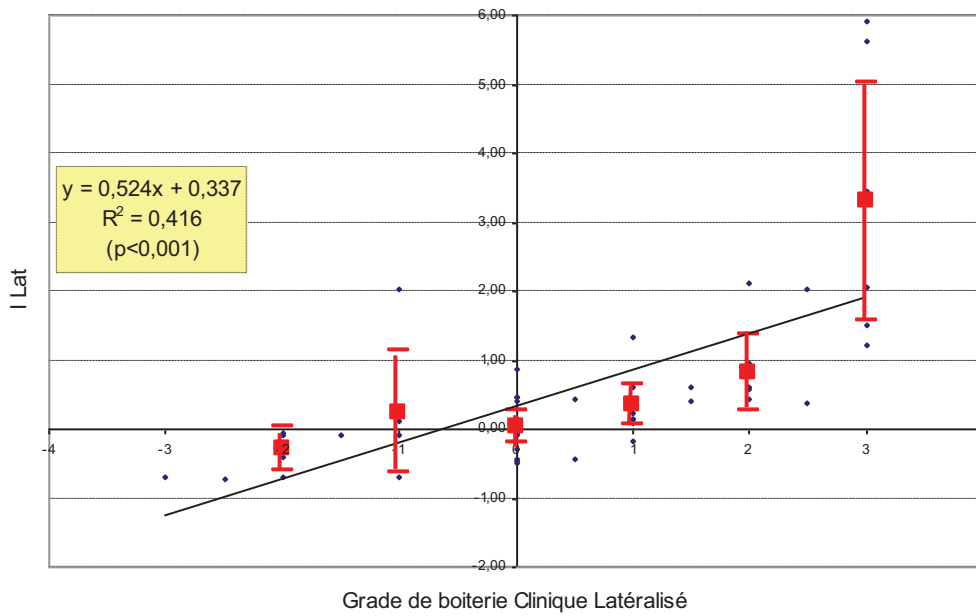


Figure 36 : Tracé de l'ISG en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Postérieurs

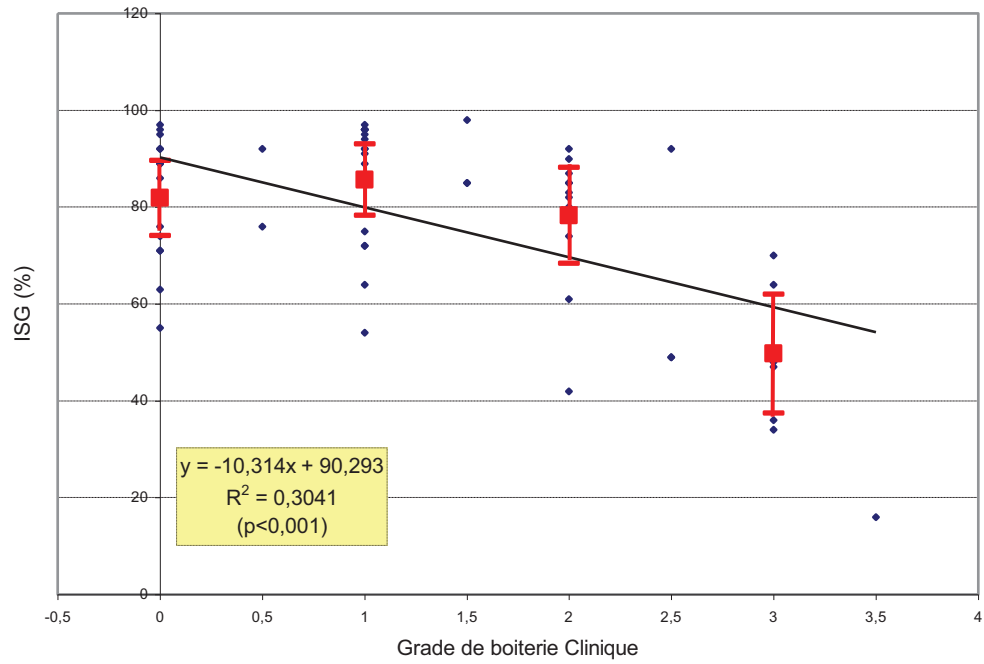
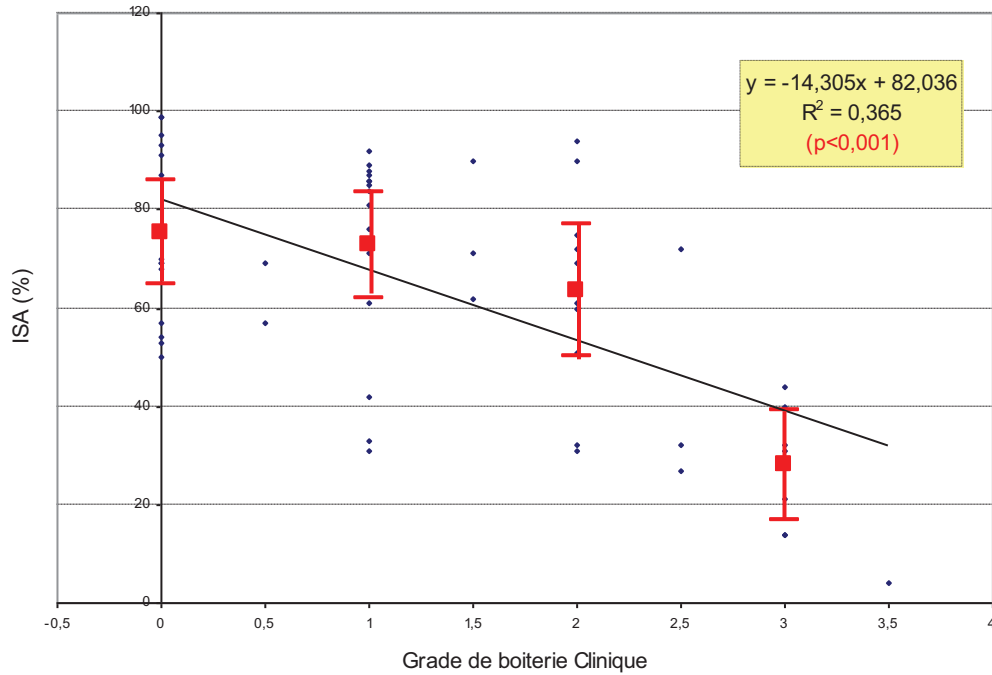


Figure 37 : Tracé de l'ISA en fonction du Grade de boiterie Clinique, pour les Postérieurs



Ces graphiques, ainsi que le tableau 8, démontrent qu'il existe une corrélation linéaire statistiquement significative ($p < 0,001$) entre les indices de symétrie et de latéralisation issus de la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique sur vidéo, à l'exception de l'ISG antérieur (absence de significativité) et de l'ISA antérieur ($p < 0,05$).

Tableau 8 : Corrélation entre les indices de symétrie et de latéralisation issus de la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique

	Antérieurs				Postérieurs			
	ISG/ISA	ISG/GC	ISA/GC	lLat/GCL	ISG/ISA	ISG/GC	ISA/GC	lLat/GCL
r	0,725	-0,214	-0,341	0,519	0,920	-0,551	-0,604	0,493
r²	0,526	0,046	0,116	0,270	0,847	0,304	0,365	0,243
p	$p < 0,001$	NS	$p < 0,05$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

3. Influence de la vitesse du cheval sur la qualité des résultats

L'analyse des coefficients de corrélation entre les différents paramètres en fonction de la vitesse du cheval montre que la corrélation entre la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique est d'autant meilleure que la vitesse du cheval est modérée (Tableau 9). En effet, que ce soit pour les antérieurs ou les postérieurs, lorsque la vitesse est supérieure à 40km/h, la corrélation entre les différents paramètres est systématiquement diminuée, voire absente pour les indices de symétrie des antérieurs.

Tableau 9 : Calculs des coefficients de corrélation entre les indices de symétrie et de latéralisation de la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique, en fonction de la vitesse du cheval

	Effectif	Total		Vitesse < 40km/h		Vitesse > 40km/h	
		r	p	r	p	r	p
Antérieurs	Effectif	54		29		25	
	ISG/ISA	0,725	$p < 0,001$	0,910	$p < 0,001$	0,734	$p < 0,001$
	ISG/GC	-0,214	NS	-0,442	$p < 0,05$	-0,225	NS
	ISA/GC	-0,341	$p < 0,05$	-0,453	$p < 0,05$	-0,354	NS
lLat/GCL	0,519	$p < 0,001$	0,711	$p < 0,001$	0,397	$p < 0,05$	
Postérieurs	Effectif	57		31		26	
	ISG/ISA	0,920	$p < 0,001$	0,952	$p < 0,001$	0,915	$p < 0,001$
	ISG/GC	-0,551	$p < 0,001$	-0,639	$p < 0,001$	-0,509	$p < 0,01$
	ISA/GC	-0,604	$p < 0,001$	-0,665	$p < 0,001$	-0,550	$p < 0,01$
lLat/GCL	0,493	$p < 0,001$	0,640	$p < 0,001$	0,539	$p < 0,02$	

TROISIEME PARTIE : DISCUSSION

I. ANALYSE CRITIQUE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A. Choix portant sur le matériel

1. Etude portant sur des chevaux présentés en consultation au CIRALE

Pour cette étude, les chevaux testés sont tous des trotteurs de course examinés par le Pr. DENOIX sur l'hippodrome de Cabourg. L'effectif de chevaux testés n'a pas été sélectionné ; on peut donc considérer que les cas inclus sont des cas spontanés, échantillonnés de façon aléatoire dans l'effectif des chevaux contre-performants présentés à la consultation du Pr. DENOIX. De ce fait, la répartition entre les boiteries antérieures et postérieures, et le grade de boiterie, n'ont pas pu être contrôlés en amont. En contrepartie, nous nous sommes placés exactement dans les conditions de terrain, ce qui permet d'estimer sincèrement la bonne adaptation du système. Les propriétaires des chevaux ne sont pas prévenus à l'avance de ces essais, et le planning des consultations est relativement serré ; la consigne à suivre est donc de ne pas allonger le temps d'examen habituel du cheval. Ainsi, le système doit être installé très rapidement au cours de la préparation du cheval à entrer en piste.

2. Qualités et positionnement des capteurs accélérométriques

a. Capteurs accélérométriques simples et légers, avec carte mémoire intégrée

Les capteurs accélérométriques utilisés sont les plus simples possibles, et de ce fait, petits (62x41x18mm) et légers (53g). Ils sont donc discrets, et n'interfèrent pas avec la locomotion du cheval.

La simplification principale du système réside dans l'utilisation de cartes mémoires SD, qui peuvent enregistrer l'ensemble des données au cours d'un examen complet. Cela constitue un gros avantage par rapport aux autres systèmes de terrain qui utilisent classiquement la télémétrie pour transférer les données à un ordinateur portable situé à proximité. La télémétrie permet de s'abstenir de nombreux câblages ; néanmoins, elle constitue encore une restriction puisque le lien télémétrique entre le cheval et l'ordinateur est généralement limité à environ 150m. De plus, si le champ de vision n'est pas dégagé entre l'émetteur et le récepteur, la distance maximale est considérablement plus courte (Pfau *et al.*, 2007).

De plus, la possibilité de réaliser les enregistrements sur une longue période est très intéressante, la durée moyenne de chaque examen étant d'environ 25 minutes. En effet, Kramer *et al.* (2004) reconnaissent que l'enregistrement d'un plus grand nombre de foulées par essai permet une meilleure représentation de l'ensemble des mouvements du cheval. L'évaluation d'un grand nombre de foulées est particulièrement importante chez les chevaux présentant des boiteries modérées ou intermittentes.

Le principal avantage du système présenté est donc sa mémoire intégrée, qui lui confère une bonne autonomie et lui permet d'enregistrer un nombre très important de données.

b. Positionnement des capteurs accélérométriques

(1) Accéléromètre fixé sur le harnais

Un accéléromètre est fixé sur le harnais pour pouvoir évaluer la symétrie locomotrice des membres antérieurs. L'anatomie de dos, en particulier la conformation du garrot, ne permet pas de positionner l'appareil exactement à la verticale des membres antérieurs. Celui-ci est donc placé un peu plus caudalement. Pour simplifier l'installation, le capteur est alors fixé directement sur le harnais.

Pour évaluer une boiterie antérieure, les mesures portent le plus souvent sur les mouvements de la tête (Peham *et al.*, 1996, 1999 ; Buchner *et al.*, 1996 ; Keegan *et al.*, 1997, 2001). De plus, pour quantifier une boiterie antérieure, Buchner *et al.* (1996) ont montré que les indices calculés à partir du marqueur fixé sur la tête, en particulier l'accélération maximale, sont plus sensibles que ceux calculés à partir du marqueur fixé sur le garrot, les variations des mouvements du garrot étant faibles. Néanmoins, le positionnement sur la tête présente l'inconvénient d'augmenter l'incidence des mouvements corporels parasites qui perturbent les mesures. De plus, il est plus difficile à appliquer chez le trotteur de course étant donné son harnachement qui lui maintient la tête fixe, et limite ainsi les mouvements de balancier de la tête. Le positionnement en regard du garrot, tel qu'il a été réalisé par Audigié *et al.* (2002), devait apporter une plus grande spécificité aux mesures et nous a donc semblé plus adapté.

(2) Accéléromètre fixé sur le tuber sacrale

Comme nous l'avons constaté au vu des différentes études, l'amplitude du déplacement du tuber sacrale semble être le meilleur indicateur de la symétrie locomotrice des membres postérieurs (Buchner *et al.*, 1996 ; Peham *et al.*, 2001 ; Audigié *et al.*, 2002 ; Kramer *et al.*, 2004 ; Church *et al.*, 2009).

Les indicateurs portant sur les tuber coxae sont plus difficiles à interpréter étant donné l'asymétrie naturelle des mouvements de l'angle de la hanche. Pfau *et al.* (2007) présentent une analyse descriptive du tracé du déplacement vertical des tuber coxae permettant l'identification du membre boiteux : le critère principal à repérer est le mouvement d'élévation de la hanche, dit « hip-hike » : une élévation rapide est observée à environ 60-90% du temps de la foulée, et le deuxième pic minimum (à environ 60-70% du temps de la foulée) a une valeur plus faible que le premier. Ainsi, l'asymétrie est directement observable sur ce tracé ; néanmoins, le mouvement d'élévation de la hanche est plus évident sur le tracé du déplacement vertical du tuber sacrale que sur celui des tuber coxae (Church *et al.*, 2009). Le paramètre le plus adapté pour à la fois déterminer le degré de la boiterie et identifier le membre boiteux est le ratio d'énergie du tuber sacrale (Church *et al.*, 2009). Par ailleurs, il est plus facile d'être précis et répétable en fixant un seul accéléromètre dans le plan sagittal en regard du tuber sacrale plutôt qu'en fixant deux accéléromètres exactement symétriquement en regard de chaque tuber coxae.

L'installation de cet accéléromètre requiert un peu plus de temps, pour la tonte et la fixation, qui doit se faire le plus précisément possible dans le plan sagittal.

(3) Accéléromètre fixé sur le boulet antérieur gauche

L'accéléromètre fixé sur le boulet antérieur gauche nous permet de latéraliser facilement le signal accélérométrique, en repérant la phase d'appui du diagonal gauche. La latéralisation au moyen d'un capteur additionnel en partie distale des membres est classiquement utilisée. Par exemple, Pfau *et al.* (2007) ont utilisé un capteur fixé sur le sabot antérieur gauche.

Il a été démontré qu'une charge en partie distale des membres modifie légèrement les caractéristiques de la locomotion (Wickler *et al.*, 2004), ce qui devrait être évité autant que possible lors de l'évaluation de la locomotion pour détecter les boiteries. Dans une étude portant sur les boiteries postérieures, Church *et al.* (2009) ont utilisé une centrale de mesure inertielle située sur le garrot pour latéraliser le signal. Les auteurs ont constaté un petit décalage temporel du mouvement d'élévation de la hanche caractéristique du postérieur boiteux, qu'ils expliquent par le fait que le découpage semi-automatique des foulées soit perturbé par une interférence de la boiterie postérieure sur les antérieurs. Le découpage des foulées à partir du capteur situé sur le garrot semble donc manquer de précision. Par ailleurs, lors d'essais préliminaires réalisés avec deux accéléromètres placés sur le garrot et sur la croupe, l'accélération transversale (droite-gauche) a été utilisée pour latéraliser le signal. Il est assez rapidement apparu que ce type d'algorithme était mis en échec lors d'asymétrie locomotrice marquée.

En conclusion, la recherche à la fois de la simplicité et de la précision nous ont conduit à mettre en place un troisième accéléromètre en regard du boulet antérieur gauche. L'accéléromètre étant très léger (53g), soit un poids 10 fois inférieur à celui des charges testées par Wickler *et al.* (2004), la locomotion du cheval devrait être peu perturbée. Cet accéléromètre est fixé directement sur une guêtre, permettant ainsi une installation aisée et rapide. Sur l'antérieur controlatéral sont placées l'autre guêtre formant la paire et une cloche qui compense le poids supplémentaire du capteur.

B. Choix portant sur la méthode

1. Traitement du signal accélérométrique

Dans le but de faciliter l'interprétation, il a été choisi de raisonner sur le déplacement du capteur plutôt que sur l'accélération du capteur. Ainsi, une double intégration du signal était effectuée.

Lors de cette intégration, le signal accélérométrique est filtré à l'aide d'un filtre passe haut dont la fréquence de coupure est de 1 Hz, afin de supprimer la partie constante du signal et tout artéfact dont la fréquence est trop faible pour constituer un signal d'intérêt. Pfau *et al.* (2005) ont également constaté que le filtre passe haut, avec une fréquence de coupure de 1 Hz, était approprié pour séparer les variations cycliques et non-cycliques du mouvement, et ce pour toutes les allures du cheval. Par ailleurs, le système présenté ne requiert pas d'utiliser un filtre passe bas étant donné que la fréquence d'acquisition reste relativement faible (100 Hz) et que le signal se révèle très peu bruité.

Une fois le déplacement du capteur obtenu, des indices de symétrie peuvent être calculés. Pour cela, nous avons vu que l'analyse de Fourier est fréquemment utilisée, sous différentes formes (Peham *et al.*, 1996, 1999, 2001 ; Keegan *et al.*, 2001 ; Audigié *et al.*, 2002 ; Kramer *et al.*, 2004). Audigié *et al.* (2002) précisent que l'application de la transformation de Fourier à l'énergie des harmoniques (Audigié *et al.*, 2002) plutôt qu'à l'amplitude des harmoniques

(Peham et al., 1996, 1999, 2001) semble apporter des résultats plus précis (Audigié *et al.*, 2002). C'est pourquoi, dans notre étude, nous appliquons la transformation de Fourier à l'énergie des harmoniques pour obtenir l'Indice de Symétrie Global (ISG).

De plus, d'autres indices de symétrie sont calculés à partir des données cinématiques (hauteur maximale, hauteur minimale et amplitude). Parmi ces indices, celui qui nous paraît le plus pertinent est l'Indice de Symétrie sur l'Amplitude de propulsion (ISA), qui est donc repris dans les tableaux de données (Annexes 1 et Tableau 5) et les analyses statistiques. En effet, l'amplitude de propulsion est un bon critère pour évaluer la symétrie du déplacement, qui est, comme nous l'avons vu (1^{ère} partie,II,D), souvent utilisée (Buchner *et al.*, 1996).

Par ailleurs, la lecture graphique du tracé du déplacement vertical des accéléromètres permet d'identifier facilement le membre boiteux ; néanmoins, une identification analytique objective est obtenue en calculant l'Indice de Latéralisation (ILat). Audigié *et al.* (2002) ont montré que l'amplitude de propulsion est un bon paramètre pour identifier le membre boiteux. En effet, en définissant un algorithme basé sur l'hypothèse selon laquelle la propulsion du membre boiteux est inférieure à celle du membre sain, les auteurs ont réussi à identifier le membre boiteux pour 24 chevaux /25 (Figure 4 ; Audigié *et al.*, 2002). Ainsi, dans cette étude, nous avons également choisi d'utiliser l'amplitude de propulsion pour identifier le membre boiteux.

2. Comparaison du système accélérométrique à l'évaluation clinique sur vidéo

Pour cette étude, il a été choisi de confronter les résultats fournis par la méthode accélérométrique de quantification des boiteries à ceux obtenus par l'évaluation clinique des cliniciens sur vidéo, qui sert alors de référentiel. Cette même méthodologie a été utilisée dans plusieurs études, telles que Peham *et al.* (1999, 2001), Audigié *et al.* (2002), et Weishaupt *et al.* (2001).

La comparaison entre l'évaluation clinique et l'analyse objective de la locomotion est méthodologiquement compliquée, étant donné le jugement subjectif du clinicien qui dépend principalement de son expérience individuelle (Weishaupt *et al.*, 2001). En effet, comme nous l'avons vu en 1^{ère} partie,I,B, plusieurs études ont démontré le caractère subjectif de l'examen locomoteur, à l'origine de quelques discordances, en particulier pour l'attribution d'un grade de boiterie. Dans notre cas, l'appréciation est encore plus altérée par l'enregistrement vidéo dont la qualité est souvent médiocre à grande vitesse (vibrations, flou, etc...).

La comparaison du système accélérométrique à une autre méthode d'analyse telle que l'analyse cinématique, comme l'ont fait par exemple Leleu *et al.* (2002) ou Keegan *et al.* (2004), aurait pu être envisagée. Mais la comparaison de deux méthodes d'analyse apporte beaucoup moins d'informations, étant donné qu'on ne compare réellement que l'acquisition des données, leur exploitation étant assez similaire. Il nous a donc semblé plus intéressant de comparer notre système à l'évaluation clinique, dont l'approche globale de la locomotion du cheval donne des informations très différentes. De plus, l'application de l'analyse cinématique aux conditions de terrain est quasi impossible ; cela nous aurait donc éloigné des objectifs de notre étude, à savoir vérifier la simplicité et la rapidité d'utilisation du système sur le terrain.

C'est pourquoi, nous avons choisi comme référentiel l'évaluation clinique, qui permet une comparaison à l'existant. Il est toutefois nécessaire de garder à l'esprit les imperfections de

cette méthode de référence, qui ne peut être considérée comme un « gold standard » (Keegan, 2007).

L'évaluation clinique s'effectue à partir des enregistrements vidéo réalisés sur la piste, dans lesquels le cheval est filmé de côté. Pour chaque intervalle d'étude, la vidéo correspondante est sélectionnée grâce à un chronométrage synchronisé, puis un découpage affiné permet d'effacer les portions vidéo de mauvaise qualité. La lecture vidéo est réalisée au ralenti (8 images par minute) ce qui permet d'observer plus précisément les mouvements du cheval. L'évaluation clinique ainsi réalisée par le Pr. DENOIX, spécialisé en pathologie locomotrice du cheval et très accoutumé à la lecture vidéo de trotteurs de course évoluant à grande vitesse, nous semble donc suffisamment fiable pour servir de référence comparative. De plus, l'évaluation clinique à partir du film vidéo synchronisé avec le système expert nous permet simplement d'étudier exactement les intervalles correspondants, ce qui est indispensable dans notre protocole expérimental.

Le caractère subjectif de l'évaluation clinique qui nous sert de référentiel constitue néanmoins une limite à notre étude comparative, d'autant plus que la qualité du film vidéo a posé quelques difficultés. Effectivement, la piste intérieure sur laquelle la voiture circulait était bordée de nombreux poteaux, qui cachaient régulièrement le cheval, et les irrégularités de la route engendraient des secousses dans le film vidéo. De plus, les trotteurs de course examinés sur l'hippodrome de Cabourg par le Pr. DENOIX sont systématiquement filmés, dans le cadre de l'examen locomoteur sur piste ; ainsi, une première voiture suivait déjà le cheval de côté, et la deuxième voiture de l'étude suivait donc le cheval avec un léger décalage, ce qui provoque un défaut de parallaxe et gêne l'interprétation de la symétrie locomotrice. Pour palier à ce défaut qualitatif du film vidéo, les intervalles ont été recoupés mais certains, illisibles, ont dû être éliminés. Ainsi, l'évaluation de la locomotion du cheval était d'autant plus difficile que la vidéo n'était pas de très bonne qualité. De plus, afin d'évaluer l'exactitude, et la répétabilité de cette évaluation clinique, il aurait été intéressant qu'un collègue d'experts en pathologie locomotrice visualise les vidéos ; mais ceci n'était matériellement pas envisageable. Keegan (2007) précise en effet que, lorsqu'une gradation subjective de la boiterie est utilisée, il est moins précis mais plus exact d'utiliser la valeur moyenne de plusieurs examinateurs plutôt qu'un seul.

En conclusion, il est certain qu'une évaluation clinique subjective, qui plus est à grande vitesse et sur enregistrements vidéo, ne constitue pas un référentiel parfait ; néanmoins, elle peut servir de base à une interprétation comparative en considérant cette évaluation comme la méthode usuelle, si ce n'est de référence.

II. ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS OBTENUS

A. Adaptation du système accélérométrique aux conditions d'exercice sportif

Le temps moyen d'installation complète du système est de 8 minutes, ce qui est très court en comparaison à d'autres systèmes, tels que celui de Keegan *et al.* (2004) qui réclame 20 minutes pour être mis en place. La fixation de deux accéléromètres directement sur le matériel (sur le harnais et sur la guêtre) a permis de diminuer nettement ce temps d'installation. Peu de matériel étant nécessaire, les essais sont très pratiques à mettre en oeuvre. De plus, l'enregistrement en continu, sur une durée moyenne de 25 minutes (versus quelques minutes dans l'étude de Keegan *et al.*, 2004) permet de réduire significativement les interactions avec le cheval ; ainsi, le système est installé avant l'entrée sur piste, puis retiré à la sortie, et pendant tout l'examen locomoteur, il n'y a aucune manipulation à faire. La seule contrainte rencontrée est de chronométrer tout l'examen sur piste, pour pouvoir définir les intervalles d'étude.

Ainsi, nous voyons que ce système est très pratique à utiliser : facile et rapide à installer, simple et léger, n'occasionnant donc pas de gêne pour le cheval, et résistant au trot à grande vitesse.

B. Qualité des résultats fournis par le système accélérométrique

1. Analyse des discordances observées entre la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique.

La corrélation entre la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique est linéaire et significative (à l'exception de l'ISG pour les antérieurs). Néanmoins, on observe quelques discordances lors de l'identification du membre boiteux entre la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique sur vidéo.

La sensibilité de la méthode accélérométrique à latéraliser correctement la boiterie est de 65% pour les boiteries antérieures et de 86% pour les boiteries postérieures (Tableaux 6 et 7). Ce résultat est médiocre en ce qui concerne les boiteries antérieures et plutôt satisfaisant en ce qui concerne les boiteries postérieures. Cette différence pourrait en partie s'expliquer par le fait que parmi les chevaux de cette étude aucun ne présente de vraie boiterie antérieure. Les asymétries antérieures observées sont le plus souvent des reports d'appui de compensation ayant pour origine une boiterie postérieure. Néanmoins, on ne peut exclure l'hypothèse selon laquelle la fixation de l'accéléromètre sur le harnais expliquerait une sensibilité moindre des mesures par rapport à une fixation de l'accéléromètre directement sur la croupe du cheval. Il serait donc intéressant, dans une étude ultérieure, d'appliquer la méthode sur un plus grand effectif de chevaux, parmi lesquels des chevaux présentant de vraies boiteries antérieures ; et de comparer les résultats obtenus en fixant l'accéléromètre soit sur le harnais soit directement sur le garrot, soit sur la tête. L'absence de vraies boiteries antérieures peut s'expliquer par le mode de sélection de l'effectif testé (cas spontanés présentés à la consultation du Pr. DENOIX). Ceci pourrait de plus être directement corrélé à la discipline étudiée pour laquelle,

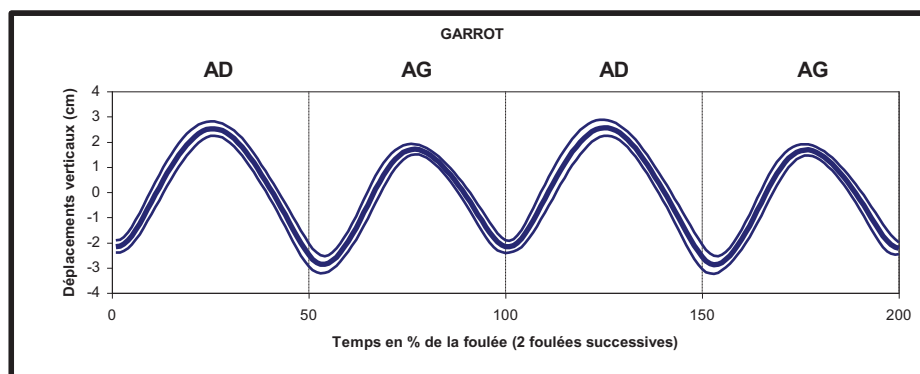
à grande vitesse, les asymétries postérieures sont plus fréquentes que les asymétries antérieures.

La majorité des discordances surviennent pour de discrètes asymétries : l'ISG correspondant est alors de l'ordre de 97-98% pour les antérieurs, et de l'ordre de 95-96% pour les postérieurs, avec un $ISA \geq 85\%$. Ceci peut se vérifier sur le Tableau 5 sur les intervalles $IV_{1,3}$, V_3 , $VII_{2,3}$, $X_{1,2}$, XI_7 , $XII_{1,6}$. Ces erreurs de latéralisation, pour des boiteries de faible intensité, sont plus fréquentes sur les antérieurs ; ce qui pourrait expliquer l'absence de relation significative entre l'ISG antérieur et le grade de boiterie clinique et la sensibilité médiocre de la méthode pour latéraliser une boiterie antérieure.

D'autre part, les fortes incohérences sont souvent observées sur des intervalles où le cheval se déplace à grande vitesse. En effet, sur le tableau 9, on constate que la corrélation entre les différents paramètres est globalement meilleure à vitesse moyenne plutôt qu'à grande vitesse. Cette observation doit être interprétée en prenant en compte les difficultés de lecture des intervalles à grande vitesse, à l'origine de possibles erreurs d'évaluation de la part du clinicien. En effet, sur ces enregistrements, les vibrations et les flous sont beaucoup plus importants, gênant l'appréciation du clinicien. De plus, les observations cliniques émises le jour même de l'examen locomoteur sur piste approuvent généralement les données cinématiques, comme nous avons pu le constater par exemple pour les chevaux IV, X et XI. Inversement, des discordances entre l'évaluation clinique sur piste et les relectures a posteriori sur vidéo sont mises en évidence. Aucune interprétation mécanique logique ne permet de justifier que le capteur accélérométrique réalise alternativement, sur le même cheval, des mesures correctes à petite vitesse et des mesures incorrectes à grande vitesse. En effet, la fréquence d'acquisition des données est très nettement supérieure à la fréquence des mouvements du cheval, et le positionnement du capteur n'est pas modifié pendant l'examen. Cette constatation met donc en évidence tout l'intérêt de l'analyse quantitative de la locomotion qui apporte une aide au clinicien dans les situations où l'observation visuelle est rendue difficile, du fait de la rapidité des mouvements, du milieu environnant, etc...

Par ailleurs, dans quelques cas, nous avons observé que l'Indice de Latéralisation, correspondant au rapport des amplitudes de propulsion, ne permet pas d'identifier correctement le membre boiteux. Effectivement, sur quelques intervalles, on observe un ISA proche de 100% avec néanmoins une modification des autres paramètres, notamment les hauteurs maximale et minimale. Ce phénomène pourrait être défini comme un déphasage du tracé d'un diagonal à l'autre (Figure 38). Dans cet exemple, l'Indice de Latéralisation identifie un soulagement antérieur gauche, tandis que la charge est réduite lors de l'appui antérieur droit, caractérisant donc un soulagement antérieur droit, comme cela a été déterminé lors de l'évaluation clinique. Ce phénomène de déphasage du tracé est observé sur plusieurs intervalles (III_3 , VI_6 , XII_1) sur lesquels la méthode accélérométrique et l'évaluation clinique ne sont pas correctement corrélées.

Figure 38 : Tracé du déplacement vertical du garrot du cheval VI se déplaçant au trot à 45 km/h (intervalle VI₆) : ISG = 88% ; ISA = 99%



2. Comparaison des résultats obtenus à ceux publiés dans d'autres études.

Tout d'abord, l'analyse statistique de corrélation nous montre que les indices de symétrie et de latéralisation obtenus à partir de la méthode accélérométrique sont proportionnels au grade de boiterie déterminé cliniquement, à l'exception de l'ISG antérieur. La corrélation entre l'ISG, l'ISA, l'ILat et le grade de boiterie clinique est linéaire et significative, avec le plus souvent $p < 0,001$ (Tableau 8).

Le « Système Equimétrie », appliqué par Weishaupt *et al.* (2001), comprenant 2 accéléromètres sur le sternum et sur la croupe, a également été comparé à l'évaluation des cliniciens. Pour la classification de 22 chevaux selon 3 groupes (chevaux sains, chevaux présentant une boiterie antérieure et chevaux présentant une boiterie postérieure), les résultats ont montré une corrélation significative entre les groupes formés par les cliniciens et les groupes formés par le système accélérométrique, avec $r = 0,47$ et $p < 0,05$. Ces résultats sont donc assez similaires à ceux obtenus dans notre étude. Par contre, l'identification du membre boiteux à partir du « Système Equimétrie » n'a pas été étudiée.

Ainsi le système accélérométrique a fourni des résultats aussi satisfaisants que ceux déjà publiés pour la quantification de la boiterie, et ce malgré une utilisation à grande vitesse, dans les conditions de terrain. De plus, elle apporte une information supplémentaire par l'identification du membre boiteux, jusqu'à lors rarement déterminé à l'aide des méthodes d'analyse quantitatives.

3. Apports complémentaires de la méthode accélérométrique

Au delà de l'identification et de la quantification des boiteries, la méthode accélérométrique permet de mettre en évidence quelques caractéristiques de la locomotion du trotteur de course. Les cas cliniques présentés aident à la compréhension des asymétries à grande vitesse. En effet, nous avons pu observer chez plusieurs chevaux de cette étude qu'une boiterie postérieure modérée à marquée peut être associée à une asymétrie locomotrice antérieure. Nous supposons que cette asymétrie antérieure serait provoquée par l'asymétrie de propulsion postérieure. Les mécanismes de compensation relatifs aux charges d'appui tendent à réduire la charge imposée au membre boiteux, engendrant donc un report d'appui caractéristique (Denoix *et al.*, 2007).

L'influence d'une boiterie antérieure sur les mouvements de la tête, et l'influence d'une boiterie postérieure sur les mouvements du bassin sont décrites dans de nombreux livres (Stashak, 1989). Mais, sur un quadrupède, une douleur dans un membre peut avoir une influence sur les mouvements de l'ensemble du corps de l'animal, comprenant la tête, la croupe, et les autres membres ; ce sont des mouvements de compensation. La discrimination entre une vraie boiterie, causée par un défaut structurel ou fonctionnel, et une fausse boiterie, sans lésion ni altération fonctionnelle, est nécessaire pour ne pas mal interpréter les modifications de la locomotion du cheval. Il est donc important de connaître les mécanismes de report d'appui.

Ces mécanismes de compensation ont déjà été évoqués dans plusieurs études, sur des chevaux examinés au trot à petite vitesse, à la fois pour les antérieurs et les postérieurs. Stashak (1989) a décrit le mécanisme de report d'appui lors d'une boiterie postérieure, qui a ensuite été quantifié en utilisant une méthode cinématique dans plusieurs études (Buchner et al., 1996 ; Uhlir *et al.*, 1997 ; Weishaupt *et al.*, 2004b ; Keegan, 2007). Une vraie boiterie postérieure, modérée à sévère, peut être associée à un soulagement de l'antérieur ipsilatéral. La relation de cause à effet entre ces deux asymétries a été vérifiée par la réalisation d'une anesthésie diagnostique sur le membre postérieur qui entraînait une diminution significative du soulagement antérieur (Uhlir *et al.*, 1997). Le cheval baisse la tête lors de l'appui du diagonal comprenant le postérieur affecté de façon à reporter la charge sur son antérieur plutôt que sur son postérieur, réduisant ainsi son inconfort. Selon Uhlir *et al.* (1997), l'intensité du report d'appui antérieur n'est pas liée à la sévérité de la boiterie postérieure ; mais cette théorie est réfutée par Kelmer *et al.* (2005), qui ont montré que la boiterie antérieure compensatoire est deux fois plus sévères lorsqu'on double l'intensité de la vraie boiterie postérieure. Weishaupt *et al.* (2004b), dans une étude menée sur un tapis roulant instrumenté, ont démontré que le report d'appui antérieur se définit davantage par une variation de la force d'impulsion verticale (I_z), plutôt que par une variation de la force d'appui verticale (F_z), sur les antérieurs (I_z correspondant à l'intégrale de F_z en fonction du temps pendant la durée de la phase d'appui). Le cheval tend à réduire la charge sur le postérieur atteint en réduisant la force d'impulsion de ce membre et en la redistribuant sur le postérieur controlatéral et l'antérieur du diagonal correspondant, en limitant l'augmentation de charge d'appui compensatoire sur ces membres (Weishaupt *et al.*, 2004b, 2008). Ainsi, nous voyons que le mécanisme de report d'appui antérieur lors d'une boiterie postérieure a été bien décrit au trot à petite vitesse.

Par contre, peu d'études ont analysé les mécanismes de report d'appui au trot à grande vitesse (Denoix *et al.*, 2007). Or, à grande vitesse, les mécanismes de compensation sont différents de ceux observés à vitesse réduite, ce qui s'explique par une stratégie différente dans l'utilisation de la masse d'inertie du tronc (Denoix *et al.*, 2007). A grande vitesse, une boiterie postérieure gauche s'accompagne d'une réduction d'appui sur le diagonal droit (donc sur l'antérieur droit) et d'une surcharge du diagonal gauche (donc de l'antérieur gauche) (Denoix *et al.*, 2007). Nous observons le même mécanisme de report d'appui caractéristique du trot à grande vitesse chez plusieurs chevaux de cette étude (chevaux V, VI et XII ; Figures 28 à 30). De même qu'à petite vitesse, ce report d'appui antérieur n'est pas systématique et ne semble pas lié à la sévérité de la boiterie postérieure ; il est possible d'observer une boiterie postérieure marquée sans aucune interférence antérieure (cheval II). Par contre, le report d'appui antérieur semble se manifester d'autant plus que la vitesse augmente (cheval XII ; Figure 29). Les caractéristiques de l'asymétrie antérieure compensatoire sont variées (cheval V ; Figure 30) et n'ont donc pas pu être définies précisément.

Ainsi, plusieurs chevaux de cette étude illustrent bien ce mécanisme de report d'appui antérieur spécifique au trot à grande vitesse ; néanmoins, les caractéristiques mises en évidence ne sont que de simples constatations, qui mériteraient d'être vérifiées auprès d'un plus grand effectif dans une étude ultérieure. Nous voyons donc que l'analyse quantitative de

la locomotion permet également de mettre en évidence et de décrire des caractéristiques de la locomotion du cheval.

Par ailleurs, Audigié *et al.* (2002) ont émis l'hypothèse que le tracé du déplacement du capteur, défini par $\Delta\Phi$, pourrait permettre de déterminer si à une lésion particulière de l'appareil locomoteur correspond un tracé du déplacement vertical du tronc particulier. De même, on pourrait se demander si les données cinématiques du déplacement vertical du garrot ou de la croupe apportent des informations supplémentaires pour caractériser la boiterie, qui pourraient être reliés à une lésion particulière de l'appareil locomoteur. Mais, le faible effectif de chevaux examinés ne nous permet pas de pousser l'interprétation jusque là.

III. Bilan : avantages et limites de la méthode accélérométrique

Les résultats obtenus dans cette étude semblent prometteurs. La méthode accélérométrique s'adapte très bien aux conditions de terrain et elle permet de détecter l'asymétrie locomotrice, d'attribuer un grade à cette asymétrie et d'identifier le membre boiteux, avec une sensibilité proche de l'évaluation clinique, répondant ainsi aux objectifs posés. De plus, nous avons vu que lorsque le cheval se déplace à grande vitesse, l'évaluation de la boiterie par la méthode accélérométrique semble plus précise que l'évaluation clinique sur vidéo, ce qui est logique étant donné les conditions d'observation difficiles à grande vitesse.

L'asymétrie locomotrice peut être gradée et latéralisée ; par contre, des problèmes se posent lorsqu'il faut déterminer un seuil pour distinguer une locomotion symétrique d'une locomotion asymétrique. Les écart-types très élevés dans toutes les catégories indiquent une variabilité inter-individuelle très importante, majorée qui plus est par les quelques fortes incohérences évoquées précédemment. Quelques chevaux dont la locomotion est symétrique présentent des indices de symétrie faibles tandis que d'autres chevaux boiteux présentent des indices de symétrie élevés. Ces écart-types très élevés, couplés au faible effectif de chevaux testés, ne permettent donc pas de déterminer une valeur seuil pour les indices de symétrie. De même que chez l'homme, des asymétries locomotrices physiologiques ont été décrites chez le cheval par Drevemo *et al.* (1980c) ; et la sensibilité individuelle joue un rôle important dans l'expression de la douleur sur la locomotion (Buchner *et al.*, 1996). Ainsi, les indices quantitatifs (ISG, ISA) indiquent précisément toute asymétrie du mouvement ; cependant, la décision, pour savoir quel niveau d'asymétrie est considéré comme physiologique et quel niveau d'asymétrie est considéré comme pathologique, appartient au clinicien.

Par ailleurs, une des principales limites de la méthode accélérométrique est que l'analyse ne repose réellement que sur deux points de la ligne dorsale. Inversement, lors de l'examen dynamique, le clinicien observe le cheval sous tous les angles et dans plusieurs plans, pouvant ainsi enregistrer de nombreuses informations supplémentaires, telles que des modifications de la trajectoire des membres : défaut de protraction, défaut de rétraction, un défaut de descente du boulet, ou au contraire un défaut de soutien du boulet, etc....

Il faut donc bien garder à l'esprit que la méthode d'analyse quantitative de la locomotion du cheval complète et documente l'examen clinique traditionnel ; mais elle n'a pas pour but de se substituer à celui-ci, car, comme nous l'avons vu, l'examen clinique apporte des informations supplémentaires essentielles. La méthode accélérométrique constitue un outil diagnostique complémentaire à disposition des cliniciens, qui s'adapte bien aux conditions de l'exercice intensif (trot à grande vitesse) et qui permet de détecter l'asymétrie locomotrice, d'attribuer un grade à cette asymétrie et d'identifier le membre boiteux. Nous avons pu vérifier que la simplicité de la méthode (utilisation de simples accéléromètres) n'entrave pas la qualité de l'analyse de la locomotion pour une utilisation en pratique. La méthode accélérométrique apporte une aide précieuse au clinicien, en particulier dans les circonstances où lorsque l'examen visuel est rendu difficile (examen à grande vitesse, examen à distance,...). En attribuant une valeur chiffrée à la boiterie, elle peut faciliter et objectiver tout examen comparatif, en permettant par exemple d'évaluer le résultat d'une anesthésie diagnostique ou l'efficacité d'un traitement, etc....

CONCLUSION

Cette étude illustre l'intérêt de la méthode accélérométrique comme outil diagnostique complémentaire pour le clinicien dans l'évaluation des boiteries.

Tout d'abord, cette méthode présente l'avantage principal d'être très pratique d'utilisation. Le matériel très léger n'occasionne aucune gêne pour le cheval ; rapide à installer, il ne nécessite pas de manipulations supplémentaires au cours de l'examen. Cette méthode permet enfin d'enregistrer un nombre très important de données, autorisant ainsi une utilisation sur des séances d'entraînement complètes : l'enregistrement est continu sur une durée supérieure à 30 minutes.

Cette étude a démontré une bonne corrélation entre l'évaluation clinique et la méthode accélérométrique, à la fois pour quantifier une boiterie et pour identifier le membre boiteux. Pour les boiteries postérieures, la sensibilité du dispositif pour latéraliser correctement le membre boiteux était de 86%. Ce résultat était moins bon pour les boiteries antérieures (65%). En ce qui concerne la gradation de la boiterie, cette étude démontre qu'il existe une corrélation linéaire statistiquement significative entre les indices de symétrie issus de la méthode accélérométrique et la gradation clinique sur vidéo (à l'exception de l'ISG pour les boiteries antérieures). Les résultats moins bons pour l'évaluation des boiteries antérieures peuvent s'expliquer par le mode de sélection de l'effectif de chevaux testés qui ne nous a pas permis d'obtenir une bonne répartition des boiteries antérieures et postérieures. C'est pourquoi il serait intéressant, dans une étude ultérieure, d'appliquer la méthode accélérométrique à un plus grand effectif de chevaux, parmi lesquels des chevaux présentant des boiteries antérieures plus marquées. Par ailleurs, d'autres emplacements du capteur antérieur pourraient également être testés (harnais, garrot, tête...) afin d'améliorer la sensibilité de la méthode pour la gradation des boiteries antérieures.

Ainsi, la méthode accélérométrique constitue un très bon outil complémentaire à disposition des cliniciens, permettant de documenter et d'enrichir l'examen locomoteur traditionnel. Son intérêt est d'apporter une aide essentielle lorsque les conditions d'examen sont rendues difficiles par la vitesse de déplacement ou le milieu environnant (examen sur piste, à distance,...). A terme, ce type d'instrumentation peut permettre de faciliter et d'objectiver tout examen comparatif, très utile notamment pour un suivi plus précis de l'évolution d'une boiterie.

BIBLIOGRAPHIE

AAEP, Guide for veterinary service and judging of equestrian events. 4th edition. Lexington (KY): American Association of Equine Practitioners ; 1991. p 19.

ARKELL M, ARCHER RM, GUITIAN FJ (2006): Evidence of bias affecting the interpretation of the results of local anaesthetic nerve blocks when assessing lameness in horses. *The Veterinary Record*, **159**, 346-349.

AUDIGIE F, POURCELOT P, DEGUERCE C, GEIGER D, DENOIX JM (2002): Fourier analysis of trunk displacements : a method to identify automatically the lame limb in trotting horses. *Journal of Biomechanics*, 1173-1182.

BACK W, BARNEVELD A, SCHAMHARDT HC, BRUIN G and HARTMAN W (1994): Longitudinal development of the kinematics of 4-, 10-, 18-, and 26-month-old Dutch Warmblood horses. *Equine Veterinary Journal Suppl* **17**, 3-6.

BARREY E, GALLOUX P, VALETTE JP, AUVINET B, and WOLTER R (1993): Stride characteristics of overground versus treadmill locomotion in the saddle horse. *Acta Anat.* **146**, 90-94.

BARREY E, HERMELIN M, VAUDELIN JL, POIREL D, VALETTE JP (1994): Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Vet J, Suppl*, **17**, 7-12

BARREY E, AUVINET B, COUROUCE A (1995): Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device. *Equine Vet J, Suppl*, **18**, 156-160.

BARREY E, DESBROSSE F (1996): Lameness detection using an accelerometric device. *Pferdeheilkunde* **12**, 617-622.

BARREY E and GALLOUX P (1997): Analysis of equine jumping technique by accelerometry. *Equine Vet J, Suppl*, **23**, 45-49.

BARREY E (1999): Methods, Applications and Limitations of Gait Analysis in Horses. *The Veterinary Journal*, **157**, 7-22.

BARREY E, EVANS SE, EVANS DL, CURTIS RA, QUINTON R and ROSE RJ (2001): Locomotion evaluation for racing in Thoroughbreds. *Equine Vet J, Suppl*, **33**, 99-103.

BUCHNER HHF, KASTNER, GIRTLER D, KNEZVIC PF (1993): Quantification of hindlimb lameness in the horse. *Acta Anatomica*, **146**, 196-199.

BUCHNER HHF, SAVELBERG HHCM, SCHAMHARDT HC, MERKENS HW and BARNEVELD A (1994a): Kinematics of treadmill versus overground locomotion in horses. *The Veterinary Quaterfly*, **16**, suppl 2, S87-S90.

BUCHNER HHF, SAVELBERG HHCM, SCHAMHARDT HC, MERKENS HW, and BARNEVELD A (1994b): Habituation of horses to treadmill locomotion. *Equine Vet J, Suppl*, **17**, 13-15.

BUCHNER HHF, SAVELBERG HHCM, SCHAMHARDT HC, BARNEVELD A (1996): Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- and hindlimb lameness. *Equine Veterinary Journal* **28**, 71-76.

CHATEAU H, RENARD L, FALALA S, VALETTE J-P, AUDIGIE F, POURCELOT P, RAVARY B, PAQUET L, DENOIX J-M, and CREVIER-DENOIX N (2007): A method for quantifying vertical displacements of the trunk and gait symmetry in horses trotting at high speed. *32^{ème} Congrès de la société de Biomécanique Lyon (France), août 2007, Computer methods in Biomechanics and Biomedical engineering* 10 (suppl.1), 165-166.

CHURCH EE, WALKER AM, WILSON AM, and PFAU T (2009): Evaluation of discriminant analysis based on dorsoventral symmetry indices to quantify hind limb lameness during over ground locomotion in the horse (publication sous presse ; *Equine Veterinary Journal*, **41**).

CLAYTON HM, SCHAMHARDT HC (2000): Measurement Techniques for Gait Analysis, In: BACK W, CLAYTON HM, editors. *Equine Locomotion*. Philadelphia : WB SAUNDERS, 55-77.

COUROUCE A, GEFFROY O, BARREY E, AUVINET B and ROSE RJ (1999): Comparison of exercise tests in French trotters under training track, racetrack and treadmill conditions. *Equine Vet J, Suppl*, **30**, 528-532.

DENOIX JM (1992): Approche sémiologique des boiteries chez le cheval : premières étapes. *Le Point Vétérinaire*, **23** (142), 1011-1023.

DENOIX JM (1995): Anesthésie diagnostique nerveuse digitale distale (ADD) : *Recueil de Médecine Vétérinaire*, **171** (10/11), 707-715.

DENOIX JM, AUDIGIE F (2004) : Imaging of the musculoskeletal system in horses, *Equine Sport Medicine and Surgery*, eds Hinchcliff KW, Kaneps AJ, Geor RJ, WB Saunders Co, Philadelphia, 161-187.

DENOIX J-M, CHATEAU H, POURCELOT P, PASQUET H, AUDIGIE F, and CREVIER-DENOIX N (2007) Analyse des troubles locomoteurs à grande vitesse. *Proceedings de la 33^{ème} Journée de la Recherche Equine*, 35-44.

DREVEMO S, DALIN G, FREDRICKSON I, and HJERTEN G (1980a): Equine Locomotion: 1. The analysis of linear and temporal stride characteristics of trotting Standardbreds. *Equine Vet J*, **12** (2), 60-65.

DREVEMO S, FREDRICKSON I, DALIN G, and BJORNE K (1980b): Equine Locomotion: 2. The analysis of coordination between limbs of trotting Standardbreds. *Equine Vet J*, **12** (2), 66-70.

DREVEMO S, DALIN G, FREDRICKSON I, and BJORNE K (1980c): Equine Locomotion: 3. The reproducibility of gait in trotting Standardbreds. *Equine Vet J*, **12** (2), 71-73.

DREVEMO S and JOHNSTON C (1994): The use of a panning camera technique in equine kinematic analysis. *Equine Vet J, Suppl*, **17**, 39-43.

FREDRICSON I, DREVEMO S, DALIN G, HJERTEN G and BJORNE K (1980): The application of high-speed cinematography for the quantitative analysis of equine locomotion. *Equine Vet J*, **12**, 54-59.

GALLOUX P and BARREY E (1997): Components of the total kinetic moment in jumping horses. *Equine Vet J, Suppl*, **23**, 41-44.

HEWETSON M, CHRISTLEY RM, HUNT ID, VOUTE LC (2006): Investigations of the reliability of observational gait analysis for the assessment of lameness in horses. *Veterinary Record*, **158**, 852-858.

KEEGAN KG (2007): Evidence-based lameness detection and quantification. *Veterinary Clinics Equine Practice*, **23**, 403-423.

KEEGAN KG, WILSON DJ, WILSON DA, FRANKENY RL, LOCH WE, and SMITH B (1997): Effects of anesthesia of the palmar digital nerves on kinematic gait analysis in horses with or without navicular disease. *Am Journal of Vet Research*, **58** (3), 218-223.

KEEGAN KG, WILSON DA, WILSON DJ, SMITH B, GAUGHAN EM, PLEASANT RS, LILLICH JD, KRAMER J, HOWARD RD, BACON-MILLER C, DAVIS EG, MAY KA, CHERAMIE HS, VALENTINO WL, VAN HARREVELD PD (1998): Evaluation of mild lameness in horses trotting on a treadmill by clinicians and interns or residents and correlation of their assessments with kinematic gait analysis. *Am Journal of Vet Research*, **59** (11), 1370-1377.

KEEGAN KG, PAI PF, WILSON DA, and SMITH BK (2001): Signal decomposition method of evaluating head movement to measure induced forelimb lameness in horses trotting on a treadmill. *Equine Vet J*, **33** (5), 446-451.

KEEGAN KG, YONEZAWA Y, PAI PF, WILSON DA, KRAMER J (2004): Evaluation of a sensor-based system of motion analysis for detection and quantification of forelimb and hind limb lameness in horses. *Am Journal of Vet Research*, **65** (5), 665-670.

KELMER G, KEEGAN KG, KRAMER J, WILSON DA, PAI PF, and SINGH P (2005): Computer-assisted kinematic evaluation of induced compensatory movements resembling lameness in horses trotting on a treadmill. *Am Journal of Vet Research*, **66** (4), 646-655.

KRAMER J, KEEGAN KG, WILSON DA, SMITH BK, WILSON DJ (2000): Kinematics of the hind limb in trotting horses after induced lameness of the distal intertarsal and tarsometatarsal joints and intra-articular administration of anesthetic. *Am Journal of Vet Research*, **61** (9), 1031-1036

KRAMER J, KEEGAN KG, KELMER G, WILSON DA (2004): Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences. *Am Journal of Vet Research*, **65** (6), 741-747.

LELEU C, GLORIA E, RENAULT G, and BARREY E (2002): Analysis of trotter gait on the track by accelerometry and image analysis. *Equine Vet J, Suppl*, **34**, 344-348.

PEHAM C, SCHEIDL M, LICKA T (1996): A method of signal processing in motion analysis of the trotting horse. *Journal of Biomechanics*, **29**, 1111-1114.

- PEHAM C, LICKA T, MAYR A, et al. (1998): Speed dependency of motion pattern consistency. *Journal of Biomechanics*, **31**, 769-772.
- PEHAM C, LICKA T, GIRTLER D, SCHEIDL M (1999): Supporting forelimb lameness: clinical judgement vs. computerised symmetry measurement. *Equine Veterinary Journal*, **31**, 417-421.
- PEHAM C, LICKA T, GIRTLER D, SCHEIDL M (2001): Hindlimb lameness: clinical judgement vs. computerised symmetry measurement. *Veterinary Record*, **148**, 750-752.
- PFAU T., WITTE T.H., WILSON A.M.A (2005): A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *The Journal of Experimental Biology*, **208**, 2503-2514.
- PFAU T, ROBILLIARD JJ, WELLER R, JESPERS K, ELIASHAR E, and WILSON M (2007): Assessment of mild hindlimb lameness during over ground locomotion using linear discriminant analysis of inertial sensor data. *Equine Veterinary Journal*, **39**, 407-413.
- POURCELOT P, AUDIGIE F, DEGUEURCE C, DENOIX JM, and GEIGER D (1997): Kinematic Symmetry Index : a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. *Veterinary Research*, **28**, 525-538.
- SIEGEL A (2001): Analyse de la locomotion du cheval par un procédé accélérométrique : application à la quantification des boiteries. Thèse Méd. Vét., Alfort, n°44.
- STASHAK TS (1989): Lahmheits diagnostik. In: Adam's Lameness in Horses, 4th edn. Ed: TS Stashak, M and H Schaper, Hannover. pp 100-156.
- TAN H., WILSON A.M., LOWE J. (2008): Measurement of stride parameters using a wearable GPS and inertial measurement unit. *Journal of Biomechanics*, **41**, 1398-1406.
- UHLIR C, LICKA T, KUBBER P, PEHAM C, SCHEIDL M, and GIRTLER D (1997): Compensatory movements of horses with a stance phase lameness. *Equine Veterinary Journal Suppl*, **23**, 102-105.
- WEISHAUP MA (2008): Adaptation strategies of horses with lameness. *Veterinary Clinics Equine Practice*, **24**, 79-100.
- WEISHAUP MA, HOGG HP, WIESTNER T, DENOTH J, STUSSI E, and AUER JA (2002): Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses. *Am Journal of Vet Research*, **63** (4), 520-527.
- WEISHAUP MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, and AUER JA (2004a): Vertical ground reaction force-time histories of sound Warmblood horses trotting on a treadmill. *The Veterinary Journal*, **168**, 304-311.
- WEISHAUP MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, and AUER JA (2004b): Compensatory load redistribution of horses with induced weightbearing hindlimb lameness trotting on a treadmill. *Equine Veterinary Journal*, **36**, 727-733.

WEISHAAPT MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, AUER JA, and BARREY E (2001): Assessment of gait irregularities in the horse : eye vs gait analysis. *Equine Veterinary Journal Suppl*, **33**, 135-140.

WICKLER S.J., HOYT D.F., CLAYTON H.M., MULLINEAUX D.R., COGGER E.A., SANDOVAL E., MCGUIRE R., and LOPEZ C. (2004): Energetic and Kinematic Consequences of Weighting the Distal Limb. *Equine Veterinary Journal*, **36**, 772-777.

ANNEXES

Annexe 1 : Données cinématiques et indices de symétrie issus de la méthode accélérométrique de quantification des boiteries, pour les antérieurs (A) et les postérieurs (P).

Annexe 2 : Moyennes et intervalles de confiance des ISG, ISA et ILat correspondants à chaque grade de boiterie clinique, pour les antérieurs (A) et les postérieurs (B)

Annexe 1 : Données cinématiques et indices de symétrie issus de la méthode accélérométrique de quantification des boiteries, pour les antérieurs

(A) et les postérieurs (B)

Cheval	Intervalles d'étude	Ordre	Timing	Vitesse (km/h)	ISG (%)		AD				AG				ILat	Lat				
					Moy	Et	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)	Moy	Et			Moy	Et		
																			Moy	Et
1	1	7'07	30	93	3	2,6	0,2	-3,2	0,3	5,8	0,4	1,8	0,2	-2,8	0,3	4,6	0,3	78	0,26	AG
	2	8'50	35	94	5	2,7	0,4	-3,1	0,3	5,9	0,6	1,9	0,4	-2,7	0,4	4,6	0,4	78	0,28	AG
	3	16'10	60	93	3	0,98	0,2	-2,2	0,2	3,2	0,3	1,8	0,2	-1,7	0,3	3,5	0,3	90	-0,09	AD
	4	17'02	55	86	4	1,2	0,3	-2,7	0,3	3,9	0,5	1,6	0,3	-1,4	0,3	3	0,4	70	0,30	AG
2	1	7'07	25	97	1	2,7	0,1	-2,8	0,1	5,5	0,2	3,4	0,1	-3,2	0,2	6,6	0,3	82	-0,17	AD
	2	7'35	40	97	1	2,1	0,2	-2,5	0,2	4,5	0,3	2,7	0,2	-2,6	0,1	5,2	0,2	86	-0,13	AD
	3	12'12	45	98	1	1,6	0,2	-2,2	0,3	3,8	0,5	1,9	0,2	2,1	0,2	4	0,2	94	-0,05	AD
	4	14'00	50	98	0	2,1	0,2	-2,7	0,3	4,8	0,4	2,3	0,2	-2,2	0,2	4,5	0,3	93	0,07	AG
	5	14'56	55	98	1	1,5	0,2	-2,2	0,2	3,7	0,3	1,7	0,2	-1,8	0,2	3,5	0,3	95	0,06	AG
3	1	7'28	30	95	4	2,1	0,2	-2	0,2	4,1	0,2	2,1	0,2	-2,7	0,2	4,8	0,3	85	-0,15	AD
	2	11'35	40	91	5	1,9	0,4	-2,2	0,4	4,1	0,6	1,6	0,4	-2,4	0,5	4	0,8	99	0,02	AG
	3	14'29	45	92	4	1,8	0,2	-2	0,3	3,8	0,4	1,5	0,2	-2,4	0,3	3,9	0,4	97	-0,03	AD
	4	15'25	50	94	4	1,3	0,3	-2	0,4	3,3	0,5	1,4	0,4	-2,1	0,3	3,6	0,5	93	-0,08	AD
4	1	4'15	15	98	1	2,4	0,2	-2,6	0,2	4,9	0,4	2,8	0,2	-2,8	0,2	5,6	0,4	88	-0,13	AD
	2	5'30	25	96	2	2,2	0,2	-2,6	0,2	4,7	0,4	2,9	0,2	-2,8	0,2	5,7	0,4	83	-0,18	AD
	3	7'20	30	98	1	2,1	0,2	-2,6	0,2	4,7	0,4	2,5	0,2	-2,3	0,2	4,8	0,3	97	-0,02	AD
	4	8'35	40	98	1	2	0,2	-2,3	0,2	4,3	0,3	2,4	0,2	-2,4	0,2	4,8	0,4	90	-0,10	AD
	5	13'56	55	94	5	1,5	0,3	-1,8	0,3	3,3	0,4	1,8	0,3	-2,1	0,4	3,8	0,5	85	-0,13	AD
5	1	5'10	25	97	2	2,9	0,2	-3,2	0,3	6,1	0,4	3,3	0,3	-3,8	0,2	7,2	0,4	84	-0,15	AD
	2	6'45	35	95	4	2,8	0,3	-2,9	0,4	5,7	0,7	3,2	0,2	-3,9	0,3	7	0,4	81	-0,19	AD
	3	10'50	40	97	2	2,2	0,3	-2,9	0,4	5,2	0,6	2,7	0,2	-3	0,4	5,7	0,5	90	-0,09	AD
	4	14'27	45	94	6	1,8	0,4	-2,8	0,3	4,6	0,6	2,6	0,4	-2,7	0,3	5,3	0,5	86	-0,13	AD

Données cinématiques et indices de symétrie _ ANTERIEURS 2/3

Cheval Intervalles d'étude

Cheval	Ordre	Intervalles d'étude	Vitesse (km/h)	ISG (%)		AD		Ampl (cm)		Max (cm)		Mini (cm)		AG		Ampl (cm)	ISA (%)	ILat	Lat	
				Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et					
6	1	8'22	20	95	2	2,3	0,2	-2,2	0,2	4,6	0,3	2,7	0,2	-3,1	0,2	5,8	0,3	78	-0,21	AD
	2	9'50	20	93	3	2,2	0,2	-2,2	0,3	4,4	0,4	2,8	0,2	-3,1	0,2	5,9	0,3	74	-0,25	AD
	3	11'27	30	97	1	2,3	0,2	-2,5	0,2	4,8	0,3	2,6	0,2	-3	0,2	5,6	0,3	86	-0,14	AD
	4	12'48	40	90	4	2,2	0,2	-1,9	0,3	4,1	0,3	2,4	0,2	-3,2	0,2	5,6	0,3	72	-0,27	AD
	5	15'35	40	80	8	2,3	0,3	-1,6	0,3	3,9	0,4	1,9	0,3	-3,3	0,3	5,3	0,3	73	-0,26	AD
	6	16'40	45	88	6	2,4	0,4	-2,2	0,3	4,7	0,5	1,7	0,2	-3	0,4	4,6	0,3	99	0,02	AG
	7	19'18	45	85	12	1,9	0,4	-1,8	0,5	3,8	0,8	1,6	0,4	-2,8	0,4	4,3	0,3	86	-0,12	AD
7	1	11'17	25	93	2	2,5	0,2	-3	0,2	5,5	0,3	3,9	0,2	-3,8	0,2	7,7	0,3	71	-0,29	AD
	2	15'28	45	97	2	2,3	0,2	-3,3	0,2	5,6	0,4	2,9	0,2	-3,1	0,2	6	0,5	93	-0,07	AD
	3	16'17	50	97	2	2,2	0,2	-3,4	0,2	5,6	0,4	2,9	0,2	-3,1	0,2	6	0,6	93	-0,07	AD
	4	19'54	45	87	3	1,9	0,2	-3,1	0,2	5	0,3	3,7	0,2	-3,9	0,2	7,6	0,3	64	-0,34	AD
	5	21'38	55	93	7	2	0,4	-3,3	0,4	5,3	0,7	3	0,4	-3,1	0,4	6,1	0,8	86	-0,13	AD
	6	23'01	25	91	2	2,3	0,1	-2,9	0,1	5,1	0,2	3,7	0,1	-3,9	0,1	7,6	0,2	67	-0,33	AD
8	1	7'43	35	97	1	2,5	0,2	-2,5	0,2	5	0,3	2,3	0,2	-3,1	0,2	5,5	0,3	92	-0,09	AD
	2	12'11	40	96	2	1,8	0,2	-2,1	0,2	3,9	0,2	2,2	0,2	-2,6	0,2	4,8	0,3	81	-0,19	AD
	3	12'59	50	96	2	1,4	0,2	-1,9	0,3	3,3	0,3	1,8	0,2	-2,1	0,2	4	0,3	84	-0,18	AD
	4	15'11	50	96	3	1,5	0,3	-1,8	0,2	3,3	0,4	1,7	0,2	-2,1	0,3	3,8	0,4	87	-0,13	AD
9	1	6'33	25	96	2	2,2	0,2	-2,8	0,3	5	0,4	2,6	0,2	-2,1	0,3	4,7	0,3	94	0,06	AG
	2	15'48	50	97	3	2,1	0,2	-2,6	0,3	4,7	0,5	2,6	0,2	-2,6	0,3	5,2	0,4	89	-0,10	AD
	3	17'34	50	93	5	1,8	0,4	-2,5	0,5	4,3	0,6	2,4	0,4	-2,3	0,5	4,7	0,6	91	-0,09	AD
	4	18'21	55	93	5	1,8	0,4	-2,5	0,4	4,3	0,6	2,2	0,4	2,2	0,5	4,4	0,7	97	-0,02	AD
	5	21'04	25	94	3	1,9	0,3	-2,5	0,5	4,4	0,6	2,8	0,3	-2,5	0,4	5,2	0,5	84	-0,15	AD

Cheval Intervalles d'étude **Données cinématiques et indices de symétrie _ ANTERIEURS 3/3**

Cheval	Ordre	Intervalles d'étude	Vitesse (km/h)	ISG (%)		AD			AG			ILat	ISat (%)	Lat						
				Moy	Et	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)									
				Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et				Moy	Et				
10	1	5'06	25	98	1	2,6	0,2	-2,4	0,3	5	0,3	2,4	0,2	-2,6	0,2	5	0,3	99	0,00	S
	2	8'05	40	98	1	2,5	0,3	-2,9	0,3	5,4	0,5	2,7	0,2	-2,7	0,3	5,4	0,3	98	0,00	S
	3	12'17	45	96	3	2,2	0,3	-2,7	0,4	4,8	0,6	2,4	0,3	-2,5	0,3	4,9	0,4	97	-0,02	AD
	4	15'40	45	95	4	2	0,3	-2,5	0,4	4,5	0,5	2,4	0,4	-2,6	0,3	5	0,6	91	-0,10	AD
	5	17'03	20	93	6	2,4	0,2	-2	0,4	4,4	0,5	2,7	0,2	-3	0,5	5,7	0,6	76	-0,23	AD
11	1	10'51	25	86	6	1,9	0,2	-1,8	0,3	3,7	0,4	2,8	0,2	-3,3	0,3	6,1	0,5	60	-0,39	AD
	2	12'06	25	85	5	1,9	0,2	-1,8	0,3	3,7	0,3	2,9	0,2	-3,4	0,3	6,3	0,4	59	-0,41	AD
	3	15'32	50	93	6	1,8	0,3	-1,9	0,3	3,8	0,5	1,8	0,4	-2,3	0,3	4	0,6	93	-0,05	AD
	4	16'23	50	90	7	2	0,3	-2,2	0,3	4,3	0,5	1,5	0,4	-2,1	0,3	3,6	0,6	84	0,19	AG
	5	19'47	50	88	10	2,1	0,3	-2,2	0,3	4,3	0,5	1,3	0,3	-1,9	0,2	3,2	0,5	75	0,34	AG
	6	20'39	54	90	5	1,6	0,3	-1,7	0,3	3,3	0,4	2	0,3	-2,5	0,3	4,5	0,5	72	-0,27	AD
	7	22'20	25	96	2	2,1	0,3	-2	0,4	4,2	0,7	2,4	0,2	-2,4	0,3	4,8	0,4	87	-0,13	AD
12	1	09'09	30	98	0	2,7	0,2	-2,6	0,2	5,4	0,3	2,5	0,2	-2,8	0,2	5,3	0,3	99	0,02	AG
	2	10'35	35	98	0	2,4	0,1	-2,8	0,2	5,1	0,3	2,4	0,2	-2,5	0,2	4,9	0,4	94	0,04	AG
	3	14'58	40	98	1	2,4	0,1	-2,9	0,2	5,3	0,3	2,4	0,2	-2,4	0,3	4,8	0,4	90	0,10	AG
	4	15'59	45	90	5	2,6	0,2	-3,1	0,3	5,7	0,4	1,7	0,2	-2,1	0,3	3,8	0,4	66	0,50	AG
	5	18'46	50	78	8	2,6	0,2	-3	0,3	5,6	0,4	1,1	0,3	-1,9	0,3	3	0,5	52	0,87	AG
	6	20'26	25	97	1	2,8	0,2	-2,5	0,3	5,3	0,4	2,5	0,1	-2,9	0,2	5,4	0,2	97	-0,02	AD

Données cinématiques et indices de symétrie _ POSTERIEURS 1/3

Cheval **Intervalles d'étude**
Ordre **Timing** **Vitesse (km/h)**

	Cheval	Ordre	Timing	Vitesse (km/h)	ISG (%)		PD				PG				ISA (%)	ILat	Lat				
					Moy	Et	Max (cm)		Mini (cm)		Ampl (cm)		Max (cm)					Mini (cm)		Ampl (cm)	
							Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et				Moy	Et	Moy	Et
1	1	7'07	30	98	1	3	0,3	-3,2	0,2	6,3	0,4	3,3	0,3	-3,6	0,2	6,9	0,4	90	-0,09	PD	
	2	8'50	35	92	8	2,6	0,9	-3	0,4	5,7	1,1	3,1	0,6	-3,2	0,4	6,3	0,7	89	-0,10	PD	
	3	16'10	60	89	5	3	0,3	-1,9	0,2	4,8	0,3	2	0,4	-2,8	0,2	4,8	0,5	99	0,00	S	
	4	17'02	55	55	16	3,6	0,5	-1,6	0,2	5,2	0,6	0,7	0,8	-3	0,3	3,7	0,8	70	0,41	PG	
2	1	7'07	25	96	2	3,9	0,2	-4,2	0,2	8	0,2	3	0,2	-3,5	0,2	6,5	0,3	81	0,23	PG	
	2	7'35	40	93	2	3,4	0,2	-3,8	0,1	7,2	0,3	2,5	0,3	-2,7	0,1	5,2	0,3	72	0,38	PG	
	3	12'12	45	74	10	3,6	0,3	-3,1	0,2	6,7	0,4	1,3	0,4	-2,3	0,3	3,6	0,6	54	0,86	PG	
	4	14'00	50	96	3	2,7	0,3	-3,5	0,3	6,2	0,5	2,9	0,2	-2,5	0,3	5,4	0,4	86	0,15	PG	
	5	14'56	55	85	5	3	0,2	-3	0,3	6	0,4	1,7	0,2	-2	0,3	3,7	0,4	62	0,62	PG	
3	1	7'28	30	90	5	3	0,2	-2,9	0,2	5,9	0,2	1,8	0,3	-2,3	0,2	4,1	0,3	69	0,44	PG	
	2	11'35	40	85	10	2,6	0,7	-2,7	0,3	5,3	0,8	1,8	0,7	-2	0,3	3,8	0,7	71	0,39	PG	
	3	14'29	45	91	4	2,5	0,3	-2,7	0,2	5,2	0,3	1,9	0,4	-1,9	0,2	3,8	0,4	72	0,37	PG	
	4	15'25	50	94	5	2,3	0,6	-2,4	0,2	4,7	0,6	2,1	0,4	-2,2	0,3	4,3	0,5	92	0,09	PG	
4	1	4'15	15	92	5	3,2	0,3	-3,1	0,2	6,3	0,5	1,9	0,3	-2,6	0,2	4,5	0,4	71	0,40	PG	
	2	5'30	25	95	2	3,1	0,2	-2,9	0,2	6,1	0,4	2	0,2	-2,7	0,2	4,6	0,3	76	0,33	PG	
	3	7'20	30	86	6	1,8	0,3	-2,6	0,2	4,4	0,4	3,3	0,3	-2,9	0,2	6,2	0,4	69	-0,29	PD	
	4	8'35	40	95	3	2,3	0,3	-2,9	0,3	5,3	0,4	2,9	0,4	-2,6	0,2	5,5	0,6	95	-0,04	PD	
	5	13'56	55	71	17	1	0,6	-1,9	0,3	2,9	0,5	3,1	0,5	-2,4	0,2	5,5	0,6	53	-0,47	PD	
5	1	5'10	25	70	7	5,2	0,4	-4,8	0,3	10	0,6	1,6	0,4	-2,9	0,3	4,5	0,5	44	1,22	PG	
	2	6'45	35	64	12	5,2	0,4	-4,9	0,3	10	0,7	1,4	0,6	-2,7	0,4	4	0,9	40	1,50	PG	
	3	10'50	40	49	15	5,4	0,4	-4,3	0,4	9,7	0,7	0,3	0,8	-2,8	0,5	3,2	1,1	32	2,03	PG	
	4	14'27	45	49	18	5	0,6	-3,9	0,4	8,9	0,8	0,2	1,1	-2,7	0,3	2,9	1,1	32	2,07	PG	

Données cinématiques et indices de symétrie _ POSTERIEURS 2/3

Cheval Intervalles d'étude

Cheval	Ordre	Intervalles d'étude	Vitesse (km/h)	ISG (%)		PD				PG				ISA (%)	ILat	Lat				
				Moy	Et	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)		Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)								
								Moy	Et			Moy	Et				Moy	Et		
6	1	8'22	20	72	6	3,6	0,3	-4,2	0,3	7,7	0,4	1,7	0,3	-1,6	0,2	3,3	0,4	42	1,33	PG
	2	9'50	20	80	6	3,2	0,2	-3,6	0,3	6,8	0,4	1,7	0,2	-1,8	0,3	3,5	0,4	51	0,94	PG
	3	11'27	30	61	5	3,9	0,2	-4,5	0,2	8,4	0,3	1,4	0,2	-1,4	0,3	2,7	0,3	32	2,11	PG
	4	12'48	40	48	7	4,3	0,3	-4,7	0,3	8,9	0,5	0,9	0,2	-1,1	0,3	2	0,4	21	3,45	PG
	5	15'35	40	36	8	0,3	0,3	-4,6	0,3	9	0,6	0,6	0,4	-0,7	0,3	1,3	0,5	14	5,92	PG
	6	16'40	45	34	5	4,3	0,2	-4,4	0,3	8,6	0,5	0,3	0,1	-1	0,3	1,3	0,3	14	5,62	PG
	7	19'18	45	16	6	4,7	0,4	-4,2	0,5	8,9	0,7	-0,9	0,7	-1,3	0,5	0,4	0,4	4	21,25	PG
7	1	11'17	25	97	1	4	0,4	-4,8	0,3	8,8	0,6	3,7	0,3	-3,9	0,3	7,6	0,5	86	0,16	PG
	2	15'28	45	83	12	2,4	0,9	-4,2	0,3	6,5	1	4,9	0,6	-4,1	0,3	9	0,7	72	-0,28	PD
	3	16'17	50	74	19	1,8	1	-3,9	0,4	5,7	1	5,2	0,6	-4,3	0,3	9,5	0,7	60	-0,40	PD
	4	19'54	45	92	6	4,7	0,6	-5	0,4	9,6	1	3,2	0,6	-3,8	0,3	7	0,6	72	0,37	PG
	5	21'38	55	85	14	2,6	1	-3,9	0,4	6,5	1	4,5	0,8	-4,1	0,3	8,6	0,9	75	-0,24	PD
	6	23'01	25	92	3	4,7	0,2	-5	0,2	9,6	0,4	3,1	0,2	-3,6	0,2	6,7	0,4	69	0,43	PG
8	1	7'43	35	96	2	3,5	0,2	-3,6	0,2	7,1	0,4	2,6	0,3	-3,6	0,2	6,2	0,5	87	0,15	PG
	2	12'11	40	76	8	3,9	0,2	-2,8	0,2	6,7	0,3	1,3	0,4	-3,3	0,2	4,6	0,5	68	0,46	PG
	3	12'59	50	75	14	3,5	0,4	-2,2	0,3	5,7	0,4	1,2	0,6	-3,1	0,2	4,3	0,5	76	0,33	PG
	4	15'11	50	72	15	3,7	0,4	-2,6	0,3	6,3	0,4	1,1	0,7	-2,8	0,3	3,9	0,7	61	0,62	PG
9	1	6'33	25	92	5	2,6	0,3	-2	0,3	4,6	0,4	1,9	0,2	-3,1	0,3	5	0,3	91	-0,08	PD
	2	15'48	50	96	4	3,1	0,5	-3,3	0,2	6,4	0,6	2,7	0,6	-3,1	0,3	5,8	0,8	90	0,10	PG
	3	17'34	50	92	10	2,4	0,7	-2,9	0,2	5,4	0,9	2,9	0,7	-2,9	0,3	5,7	0,9	93	-0,05	PD
	4	18'21	55	76	19	1,4	0,9	-2,6	0,3	3,9	1	3,7	0,6	-3,1	0,3	6,8	0,8	57	-0,43	PD
	5	21'04	25	84	10	3,6	0,5	-2,9	0,4	6,4	0,7	1,6	0,5	-3,2	0,5	4,8	0,7	74	0,33	PG

Cheval Intervalles d'étude **Données cinématiques et indices de symétrie _ POSTERIEURS 3/3**

Cheval	Ordre	Intervalles d'étude	Vitesse (km/h)	ISG (%)		PD			PG			ISA (%)	ILat	Lat						
				Moy	Et	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)	Max (cm)	Mini (cm)	Ampl (cm)									
				Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et	Moy	Et				Moy	Et				
10	1	5'06	25	96	2	2,9	0,3	-3,4	0,2	6,3	0,5	2,9	0,3	-2,7	0,3	5,6	0,5	88	0,13	PG
	2	8'05	40	92	5	2,7	0,4	-3,7	0,4	6,4	0,7	3,7	0,6	-3,1	0,4	6,8	0,9	94	-0,06	PD
	3	12'17	45	87	11	2,2	0,7	-2,9	0,5	5,2	1,1	3,1	0,6	-2,6	0,5	5,7	1	90	-0,09	PD
	4	15'40	45	84	12	2,2	0,8	-3,2	0,4	5,4	1,1	2,8	0,6	-2,1	0,5	4,9	1	90	0,10	PG
	5	17'03	20	64	18	3,6	0,5	-4,6	0,7	8,2	1,2	1,8	0,5	-0,9	0,7	2,7	1,1	33	2,04	PG
11	1	10'51	25	82	10	4,2	0,4	-3,7	0,2	7,9	0,4	1,9	0,6	-3	0,2	4,9	0,7	61	0,61	PG
	2	12'06	25	85	5	4,3	0,3	-3,8	0,3	8,1	0,5	2,1	0,3	-3,1	0,2	5,1	0,4	63	0,59	PG
	3	15'32	50	89	15	2,3	0,9	-2,9	0,2	5,2	1	3,3	0,7	-2,9	0,3	6,2	1	84	-0,16	PD
	4	16'23	50	71	15	1,3	0,7	-2,8	0,4	4,1	0,8	4,1	0,6	-3,1	0,3	7,1	0,7	57	-0,42	PD
	5	19'47	50	63	23	0,9	1	-2,7	0,3	3,6	1	4,1	0,8	-3	0,4	7,1	1,1	50	-0,49	PD
	6	20'39	54	89	9	3,4	0,7	-3,3	0,3	6,7	0,9	2,1	0,6	-2,5	0,3	4,6	0,8	69	0,46	PG
	7	22'20	25	96	4	2,6	0,3	-2,6	0,4	5,3	0,5	2,1	0,3	-2,4	0,3	4,5	0,4	85	0,18	PG
12	1	09'09	30	97	2	3,1	0,3	-2,8	0,3	5,9	0,4	2,7	0,4	-3,2	0,3	5,9	0,6	99	0,00	S
	2	10'35	35	54	12	0,8	0,5	-2,2	0,2	2,9	0,7	4,9	0,3	-4,3	0,2	9,2	0,5	31	-0,68	PD
	3	14'58	40	49	9	0,6	0,5	-2,1	0,3	2,6	0,6	5,1	0,3	-4,5	0,3	9,6	0,5	27	-0,73	PD
	4	15'59	45	47	11	0,3	0,6	-2,6	0,3	3	0,7	5,3	0,3	-4,2	0,3	9,5	0,5	31	-0,68	PD
	5	18'46	50	42	14	-0,1	0,9	-2,9	0,2	2,8	0,9	5,3	0,4	-3,6	0,3	8,9	0,6	31	-0,69	PD
	6	20'26	25	95	3	3,1	0,4	-3	0,3	6,4	0,6	2,4	0,4	-2,9	0,4	5,3	0,6	87	0,21	PG

Annexe 2 : Moyennes et intervalles de confiance des ISG, ISA et Ilat correspondants à chaque grade de boiterie clinique, pour les antérieurs (A) et les postérieurs (B).

Antérieurs

Grade de boiterie Clinique	ISG (%)				ISA (%)			
			Intervalle de confiance à 95%				Intervalle de confiance à 95%	
	Moyenne	Ecart-type	m-	m+	Moyenne	Ecart-type	m-	m+
0	94	4	91	97	86	9	79	93
0,5	95	3	92	98	95	2	93	98
0+0,5	94	4	92	97	89	9	84	94
1	94	4	93	96	85	12	81	89
1,5-2	91	5	87	96	75	11	66	84

Grade de boiterie Clinique	Ilat (%)			
			Intervalle de confiance à 95%	
	Moyenne	Ecart-type	m-	m+
-2	-0,25	0,12	-0,34	-0,15
-1	-0,10	0,17	-0,18	-0,01
0	-0,04	0,16	-0,17	0,08
0,5	-0,04	0,03	-0,08	-0,01
1	0,12	0,28	-0,04	0,28

Postérieurs

Grade de boiterie Clinique	ISG (%)				ISA (%)			
			Intervalle de confiance à 95%				Intervalle de confiance à 95%	
	Moyenne	Ecart-type	m-	m+	Moyenne	Ecart-type	m-	m+
0	82	13	74	90	75	18	65	86
0-0,5	82	13	75	89	74	18	64	83
1	86	14	78	93	73	20	62	84
1,5	89	8	76	103	74	14	48	101
2	78	15	68	88	63	20	50	77
2,5	63	25	18	109	44	25	-2	89
3	50	13	37	62	28	12	17	39

Grade de boiterie Clinique	Ilat (%)			
			Intervalle de confiance à 95%	
	Moyenne	Ecart-type	m-	m+
-2	-0,29	0,27	-0,61	0,02
-1	0,24	0,85	-0,65	1,13
0	0,03	0,40	-0,20	0,26
1	0,35	0,40	0,06	0,64
2	0,82	0,60	0,26	1,37
3	3,30	2,07	1,57	5,02