



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/> 26498

**To cite this version:**

Charbonnel, Anna . *Diagnostic de boiterie de faible grade à l'aide de capteurs inertiels de locomotion chez le cheval*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2020, 106 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# DIAGNOSTIC DE BOITERIE DE FAIBLE GRADE A L'AIDE DE CAPTEURS INERTIELS DE LOCOMOTION CHEZ LE CHEVAL

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**Anna CHARBONNEL**

Née, le 20 juillet 1994 à DAMMARTIN-EN-GOELE (77)

---

**Directeur de thèse : Mme Elodie LALLEMAND**

---

**JURY**

PRESIDENT :  
**Mme Bettina COUDERC**

Professeure à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSEESSEURS :  
**Mme Elodie LALLEMAND**  
**Mme Aude FERRAN**

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

TOULOUSE, 2020

**Nom :** CHARBONNEL

**Prénom :** Anna

**Titre :** Diagnostic de boiterie de faible grade à l'aide de capteurs inertiels de locomotion chez le cheval.

**Résumé :**

Dans le cadre de l'examen locomoteur du cheval, de nombreux auteurs se sont penchés sur le développement d'une approche plus objective de la boiterie chez le cheval. L'utilisation de méthode telle que l'analyse accélérométrique présente de nombreux avantages comme la simplicité de mise en place et de fonctionnement, ainsi qu'une très grande capacité de stockage des données. En se basant sur ce contexte, l'objectif de notre étude était de corréliser les résultats d'une analyse accélérométrique et les résultats diagnostiques d'un professionnel vétérinaire afin de développer un outil performant d'analyse objective de la locomotion du cheval. L'objectif principal était de se concentrer sur les boiteries de faibles grades. Pour ce faire, le logiciel Movin'smart, créé par la société du même nom, a été utilisé et un total de 57 chevaux a été examiné par le Dr Bruno Baup.

Une analyse du tracé des accélérations dorso-ventrales et un calcul des indices de symétrie et de variabilité de l'allure ont été réalisés pour chaque enregistrement.

Les résultats montrent une correspondance significative entre les résultats accélérométriques et le diagnostic vétérinaire, permettant ainsi l'établissement d'échelles de référence aidant au diagnostic de boiterie de faible grade.

Les conclusions autour des boiteries postérieures sont plus limitées que pour les boiteries antérieures pour cause d'un trop faible échantillonnage de ce type de boiterie. Cependant, l'utilisation du système reste tout de même pertinente et de nombreuses applications pratiques sont envisageables.

**Mots clefs :** Analyse accélérométrique, cheval, locomotion, boiterie, étude expérimentale.

**Composition du jury :**

Président : Pr Bettina Couderc

Directeur : Dr Elodie Lallemand

Assesseur : Dr Aude Ferran

**Adresse de l'auteur :**

Mlle Anna Charbonnel

317 chemin de Barran

32000 Auch - FRANCE

# DIAGNOSTIC DE BOITERIE DE FAIBLE GRADE A L'AIDE DE CAPTEURS INERTIELS DE LOCOMOTION CHEZ LE CHEVAL

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**Anna CHARBONNEL**

Née, le 20 juillet 1994 à DAMMARTIN-EN-GOELE (77)

---

**Directeur de thèse : Mme Elodie LALLEMAND**

---

**JURY**

PRESIDENT :  
**Mme Bettina COUDERC**

Professeure à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :  
**Mme Elodie LALLEMAND**  
**Mme Aude FERRAN**

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation  
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

**Directeur** : Professeur Pierre SANS

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie - Thérapeutique*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

**PROFESSEURS 1° CLASSE**

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootecnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

**PROFESSEURS 2° CLASSE**

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales (ruminants)*

**PROFESSEURS CERTIFIÉS DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE**

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES HORS CLASSE**

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*

- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*  
 M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
 M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*  
 M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*  
 Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*  
 Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*  
 M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

#### **MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)**

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*  
 Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
 Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*  
 Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*  
 M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*  
 M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*  
 Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*  
 Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
 Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*  
 M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*  
 Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*  
 Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*  
 Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie - Analgésie*  
 Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*  
 Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*  
 M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*  
 M. **LHERMIE Guillaume**, *Economie de la santé animale*  
 M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*  
 Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*  
 Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*  
 M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*  
 Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
 Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*  
 M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*  
 Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

#### **ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS**

- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
 M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*  
 Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*  
 Mme **ROMANOS Lola**, *Pathologie des ruminants*

#### **ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS**

- Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
 M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*  
 M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*  
 M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*  
 M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*  
 M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*  
 M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

**En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire**

Je soussigné(e), Elodie LALLEMAND, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de Anna CHARBONNEL intitulée « Diagnostic de boiterie de faible grade à l'aide de capteurs inertiels de locomotion chez le cheval » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 09 Juin 2020  
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale  
Vétérinaire de Toulouse  
Docteur Elodie LALLEMAND



Vu :  
Le Directeur de l'Ecole Nationale  
Vétérinaire de Toulouse  
M. Pierre SANS



Vu :  
La Présidente du jury  
Professeure Bettina COUDERC



Vu et autorisation de l'impression :  
Le Président de l'Université Paul Sabatier  
M. Jean-Marc BROTO



Le Président

Jean-Marc BROTO

Mme Anna CHARBONNEL  
a été admis(e) sur concours en : 2015  
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 09/07/2019  
a validé son année d'approfondissement le : 04/06/2020  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.



## Remerciements

A Madame le Professeur Bettina Couderc,

Professeur des Universités en pharmacologie et praticien hospitalier, qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

A Madame le Docteur Elodie Lallemand,

Maître de Conférences en chirurgie des équidés de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, qui a supervisé ma thèse et que je remercie pour l'intérêt porté à mon travail et la disponibilité dont vous avez fait part.

A Madame le Docteur Aude Ferran,

Maître de Conférences en physiologie de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, qui m'a fait l'honneur et le plaisir d'accepter le rôle d'assesseur.

A Monsieur le Docteur Bruno Baup,

Docteur vétérinaire spécialisé en orthopédie équine de la Clinique du cheval, que je remercie pour le temps consacré à ma thèse et en particulier pour les enregistrements réalisés sur les chevaux de sa clientèle. Je vous remercie également pour le stage très formateur réalisé avec vous en Septembre dernier.

A toute l'équipe Movin'Smart,

Je remercie Monsieur le Professeur Michel Laurent, président de la société, pour la confiance accordée ainsi que pour le prêt du matériel. Je remercie en particulier Madame le Docteur Camille Vauthrin pour la disponibilité, la gentillesse et l'investissement dont elle a fait part à mon égard.

## TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES .....	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	6
INTRODUCTION .....	8
PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	11
I. Intérêt d'une étude objective de la locomotion du cheval .....	12
A. Principes de l'examen locomoteur traditionnel.....	12
1. Dans le cadre du diagnostic d'un trouble locomoteur .....	13
a) Déroulement de l'examen.....	13
b) Gradation de la boiterie .....	14
c) Identification du/des membre(s) boiteux .....	16
<b>(1) Boiterie d'appui / boiterie de soutien .....</b>	<b>16</b>
<b>(2) Boiterie simple / boiterie à sièges multiples.....</b>	<b>16</b>
d) Examens complémentaires .....	17
2. Dans le cadre d'une compétition d'endurance .....	19
B. Fiabilité de l'observation directe dans l'évaluation des boiteries du cheval .....	21
II. Les différentes méthodes objectives d'étude de la locomotion du cheval .....	26
A. Intérêts de l'étude de la locomotion du cheval au trot .....	26
1. Etude des mouvements.....	26
a) Mouvements de la tête .....	27
b) Mouvements du garrot .....	28
c) Mouvements du bassin .....	28
d) Compensations croisées entre les antérieurs et les postérieurs .....	29
2. Principe général des méthodes objectives d'analyse de la locomotion .....	31
B. Les méthodes cinématiques.....	33
1. Le principe .....	33
2. La mise en place des tests .....	33
3. La capture d'image .....	34

C.	Les méthodes cinétiques.....	35
1.	L'enregistrement des forces de réaction du sol.....	35
2.	L'utilisation de l'accélérométrie.....	36
a)	Principe de l'accélérométrie.....	36
b)	Application de l'accélérométrie.....	37
c)	Critères d'évaluation d'une boiterie en accélérométrie.....	40
D.	Applications de la mesure quantitative de la boiterie en complément de l'examen orthopédique traditionnel.....	42
1.	Utilisation sur le terrain des méthodes de mesures quantitatives.....	42
2.	Evaluation objective des résultats des anesthésies diagnostiques.....	42
3.	Evaluation objective de l'évolution d'une pathologie et de l'efficacité d'un traitement.....	43
4.	Visites d'achats et expertises judiciaires.....	43
5.	Expertise en courses d'endurance.....	44
E.	Le système Movin' Smart.....	46
1.	Les objectifs du système.....	46
2.	Le matériel.....	46
a)	Les capteurs.....	46
b)	L'application et le logiciel.....	47
3.	Les paramètres étudiés et interprétations.....	49
<b>DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE.....</b>		<b>55</b>
I.	<b>Introduction.....</b>	<b>56</b>
1.	Contexte expérimental.....	56
2.	Objectifs de l'étude.....	56
3.	Contraintes à respecter.....	57
II.	<b>Matériels et méthode.....</b>	<b>59</b>
1.	Les chevaux utilisés.....	59
2.	Le dispositif accélérométrique.....	60
3.	Les adaptations du logiciel et de l'interface.....	61
4.	Protocole d'enregistrement.....	63
5.	Traitements des données.....	64
III.	<b>Résultats.....</b>	<b>67</b>
A.	Examen des chevaux par une approche classique.....	67

1.	Chevaux examinés par le Dr Bruno BAUP .....	67
a)	Bilan locomoteur satisfaisant .....	67
b)	Diagnostic de boiteries antérieures .....	68
	<b>(1) Boiteries de l'antérieur droit .....</b>	<b>68</b>
	<b>(2) Boiteries de l'antérieur gauche.....</b>	<b>69</b>
c)	Diagnostic de boiteries postérieures.....	70
	<b>(1) Boiteries du postérieur droit.....</b>	<b>70</b>
	<b>(2) Boiteries du postérieur gauche.....</b>	<b>70</b>
d)	Diagnostic d'une atteinte haute.....	70
2.	Chevaux enregistrés sur le terrain.....	71
B.	Présentation des données obtenues par l'analyse accélérométrique.....	71
1.	Chevaux examinés par le Docteur Bruno BAUP .....	72
a)	Allures symétriques .....	72
b)	Asymétries à droite .....	73
c)	Asymétries à gauche.....	74
d)	Asymétries mal définies .....	75
2.	Chevaux enregistrés sur le terrain.....	75
C.	Corrélation entre le diagnostic vétérinaire et les données de l'analyse accélérométrique .....	76
1.	Bilan satisfaisant / allure symétrique .....	76
2.	Boiterie à droite / asymétrie à droite.....	76
3.	Boiterie à gauche / asymétrie à gauche .....	77
D.	Corrélation avec la gradation de la boiterie.....	78
<b>IV.</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>84</b>
A.	Discussion autour des objectifs.....	84
B.	Analyse critique du protocole expérimental.....	85
1.	Limites liées au matériel choisi.....	85
a)	Chevaux examinés par le Dr Bruno BAUP .....	85
b)	Qualités et positionnement du dispositif accélérométrique .....	86
2.	Limites liées à la méthode utilisée .....	86
a)	Protocole .....	86
b)	Traitement du signal accélérométrique .....	87
C.	Analyse critique des résultats.....	89

1. Analyse des résultats du diagnostic vétérinaire.....	89
2. Analyses des résultats accélérométriques .....	89
3. Analyse de la corrélation entre les deux résultats .....	90
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>94</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>96</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau 1 : Gradation des boiteries selon l’American Association of Equine Practitioners. ....	15
Tableau 2 : Descriptif des différentes anesthésies locorégionales possibles [11]. ....	18
Tableau 3 : Indices de symétrie, obtenus par le capteur tête, pour les quatre chevaux diagnostiqués avec une boiterie de l’antérieur droit de grade 1/5.....	79
Tableau 4 : Calculs de la moyenne et de l’écart-type de l’ensemble des indices de symétries repris dans le tableau 3. ....	79
Tableau 5 : Bilan des calculs des moyennes et écart types des indices de symétrie obtenus par le capteur tête de l’ensemble des chevaux dont le diagnostic et le résultat accélérométrique correspondent à une boiterie antérieure. ....	80
Tableau 6 : Bilan des calculs des moyennes et écart types des indices de symétrie obtenus par le capteur garrot de l’ensemble des chevaux dont le diagnostic et le résultat accélérométrique correspondent pour une boiterie antérieure.....	80
Figure 1 : Schémas récapitulatifs des sites d’anesthésie diagnostique sur un membre thoracique. ...	18
Figure 2 : Tracé sinusoïdal de l’accélération dorso-ventrale de la tête du cheval sain au cours d’un trotting. ....	27
Figure 3 : Décomposition des mouvements de la tête, du garrot et des tubers coxae au trot. ....	29
Figure 4 : Phénomènes compensatoires induits par une boiterie initiale (Uhlir <i>et al.</i> 1997). ....	30
Figure 5 : Cheval modélisé en différents segments articulés ensemble. Barrey, 1999. ....	32
Figure 6 : Signal de l’accélération dorso-ventrale lissé par la loi de Fourier d’une foulée sur un cheval non boiteux (Halling, 2010). ....	38
Figure 7 : Etablissement d’une échelle de boiterie à 3 grades à partir de l’analyse de 250 enregistrements. ....	48
Figure 8 : Signaux accélérométriques horizontaux, latéraux et verticaux enregistrés par le capteur tête sur deux foulées.....	49
Figure 9 : Mesure du rapport entre les hauteurs maximales révélant une asymétrie sur le signal accélérométrique vertical enregistré par le capteur tête. ....	50
Figure 10 : Symétrie latérale sur deux allers-retours au trot. ....	51
Figure 11 : Signal accélérométrique vertical mettant en évidence une boiterie, associé à une variabilité latérale de 40%. ....	52
Figure 12 : Signal accélérométrique vertical, associé à une variabilité latérale de 63% et une symétrie latéral ne mettant pas en évidence de boiterie. ....	52
Figure 13 : Capteur tête mis en place, couvert par une protection. ....	60
Figure 14 : Capteur garrot mis en place, sans protection. ....	60
Figure 15 : Dispositif accélérométrique mis en place. Composé par les capteurs (flèches rouge) et la sangle permettant l’embarquement du téléphone (flèche bleu). ....	61
Figure 16 : Découpage du signal accélération dorso-ventrale sur un enregistrement complet des mouvements de la tête. ....	65
Figure 17 : Découpage du signal accélération dorso-ventrale sur un enregistrement complet des mouvements du garrot.....	66

Figure 18 : Exemple d'un enregistrement reflétant une allure symétrique. ....	72
Figure 19 : Exemple d'une boiterie antérieure droite.....	73
Figure 20 : Exemple d'une boiterie postérieure droite.....	74
Figure 21 : Echelle de référence établie pour le capteur tête, distinguant les différents grades de boiteries. Indices de symétrie $> 1$ = boiterie antérieur droit ; .....	81

# INTRODUCTION

Le cheval a toujours été utilisé par l'Homme, mettant à son service sa force et sa puissance. C'est le pouvoir de sa locomotion particulière qui le rend si utile à l'Homme pour la traction ou encore la chasse. De nos jours, les chevaux ne sont plus utilisés couramment comme outils mais, avec le développement des sports équestres, sont devenus des athlètes dont l'amélioration de la performance est une problématique permanente. C'est pourquoi les problèmes locomoteurs représentent une part importante des consultations en médecine vétérinaire équine, causant une diminution de performance ainsi qu'une limitation à l'utilisation de l'animal et, par conséquent, une perte économique importante pour le propriétaire ou l'entraîneur.

Il est important de garder en tête que la locomotion du cheval résulte d'une combinaison fonctionnelle et mécanique d'un ensemble de systèmes biologiques. Le système musculo-squelettique agit en association avec les systèmes nerveux et vasculaire mais également avec les systèmes cardiovasculaires et respiratoires qui sont primordiaux pour l'apport de nutriments et de l'oxygène et l'élimination des déchets métaboliques. Tous ces systèmes fonctionnent en synergie afin de convertir l'énergie biochimique en énergie mécanique lors des contractions musculaires, permettant le déplacement de l'animal. Les paramètres extérieurs ont également une influence importante dans la locomotion du cheval. En effet, l'environnement, l'alimentation et la gestion des chevaux de sport ou de courses sont à prendre en compte car ils peuvent être à l'origine de contre-performance ou même de lésions. L'étude de la locomotion du cheval n'est donc pas à restreindre à l'étude de l'appareil locomoteur mais doit considérer le cheval dans son ensemble.

Sur les cinquante dernières années, l'augmentation du nombre de chevaux de sport et de course a suscité l'intérêt des scientifiques et les recherches sur la locomotion du cheval se sont multipliées. De nombreuses méthodes d'étude se sont développées avec pour optique une objectivation de l'approche. La plupart des systèmes développés sont très performants mais ne sont applicables que dans un cadre de recherche et non sur le terrain car trop encombrants et onéreux. C'est dans l'optique d'une utilisation sur le terrain que

nous allons nous concentrer sur la méthode accélérométrique, plus fonctionnelle pour le vétérinaire, plus particulièrement en nous servant du système Movin'Smart.

Cette thèse présente dans une première partie une approche bibliographique de l'étude de la locomotion du cheval dans laquelle est développée l'évaluation traditionnelle de la boiterie d'une part, puis d'autre part les différentes approches objectives à disposition. Une seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale de l'évaluation de la locomotion par une méthode accélérométrique dans l'objectif d'obtenir un système performant et fonctionnel sur le terrain.



# **PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **LOCOMOTION DU CHEVAL ET METHODES D'ETUDE OBJECTIVES**

## **I. Intérêt d'une étude objective de la locomotion du cheval**

L'étude de la locomotion du cheval est une étude complexe. Les trois allures de bases, adoptées par la majorité des chevaux, présentent chacune des particularités. Les asymétries associées aux allures rendent leurs observations assez inconfortables pour l'œil humain. Ces différentes allures ont longtemps été étudiées et le déroulement exact du posé de chacun des membres est bien connu. Il reste néanmoins extrêmement difficile de distinguer une simple asymétrie d'une réelle boiterie, tout comme il est rare de localiser précisément l'origine de l'anomalie au premier abord. Traditionnellement, la boiterie est évaluée par l'observation de paramètres tels que la symétrie des déplacements verticaux de la tête et de la croupe, les mouvements de l'encolure, les changements de longueur de la foulée ou de durée de la phase d'appui du membre et l'angle de flexion des articulations.

### **A. Principes de l'examen locomoteur traditionnel**

Le diagnostic de l'origine de l'affection est difficile et il est important de procéder de façon méthodique lors de l'examen locomoteur. L'orthopédie est une discipline à part entière en médecine équine. L'examen locomoteur s'applique principalement dans un contexte diagnostique mais a également sa place dans la compétition. C'est particulièrement vrai en compétition internationale de CSO ou de concours complet car il conditionne le départ. Ça l'est également en course d'endurance, à tous niveaux, car l'examen locomoteur fait part entière de la discipline, il conditionne le départ sur les tours successifs et influence le classement final.

## **1. Dans le cadre du diagnostic d'un trouble locomoteur**

### **a) Déroulement de l'examen**

L'examen locomoteur est un examen méthodique ayant pour objectifs la localisation de la douleur et l'identification de la nature de la lésion [1]. Il commence par la prise de l'anamnèse qui peut apporter de nombreuses informations et mettre en lumière un certain nombre d'éléments clés. Il se divise, ensuite, en deux étapes essentielles : l'examen statique et l'examen dynamique [2].

Au cours de l'examen statique le cheval est observé au repos. L'attention est particulièrement portée sur l'attitude du cheval, la symétrie de la musculature, les aplombs, l'orientation des articulations ainsi que sur les pieds du cheval qui peuvent être un indice sur la localisation de la boiterie [3]. La ferrure est à prendre en considération car elle peut être source d'inconfort. La palpation ainsi que la mobilisation passive des articulations sont également une part importante de cet examen.

L'examen dynamique est composé de plusieurs étapes et va faire varier certains paramètres tels que l'allure ou la nature du sol [2]. Le pas et le trot sont d'abord étudiés sur un ou plusieurs allers-retours en ligne droite, le cheval est ensuite mis en longe sur un cercle ce qui va permettre l'étude des trois allures. Il est possible de faire varier la nature du sol afin d'observer l'influence de ce paramètre sur la boiterie. Des tests de flexions actives des différentes articulations sont réalisées afin d'apprécier leurs impacts sur la locomotion du cheval. Il est primordial que tous les gestes réalisés par le clinicien soient symétriques et répétables pour qu'ils aient une signification clinique et limiter les biais d'interprétations.

La mise en longe du cheval est une part importante dans l'examen de boiterie car la trajectoire circulaire peut accentuer les boiteries de faibles degrés. Sur le cercle au trot, le cheval sain va naturellement modifier la répartition des charges sur ces membres, il va charger de façon plus importante son antérieur intérieur ainsi que son postérieur extérieur [4].

Cependant, sur un cercle la symétrie du mouvement vertical est systématiquement affectée et les mouvements asymétriques sont exacerbés surtout au niveau du membre postérieur intérieur au cercle. Des mouvements compensatoires, principalement pour les boiteries

postérieures, peuvent apparaître. La taille du cercle et la vitesse du cheval vont également avoir un impact sur la locomotion du cheval et vont affecter la symétrie du mouvement [5]. Il est donc important de prendre en compte ces caractéristiques du déplacement en cercle lors de l'examen.

En complément, un examen en condition de l'exercice sportif peut être réalisé. Le cheval peut être examiné monté ou attelé en fonction de son activité. Cela peut permettre d'apporter 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.

L'objectif de l'examen locomoteur est d'obtenir le maximum d'informations afin de localiser la région atteinte et de pouvoir ensuite poursuivre l'investigation avec des examens complémentaires ciblés sur la région du membre identifiée comme problématique.

## **b) Gradation de la boiterie**

La gradation est intéressante dans l'étude de la boiterie car elle permet une quantification des anomalies observées et permet un meilleur suivi l'évolution de la boiterie. Plusieurs systèmes de gradation existent mais le plus couramment utilisé est le classement de l'American Association of Equine Practitioners [6]. Ce classement décompose les boiteries en 5 grades en prenant en compte différentes conditions telles que la nature du sol, la main et l'allure à laquelle le cheval évolue ainsi que le mouvement qu'il suit (ligne droite ou cercle).

<b>Grades</b>	<b>Descriptions</b>
0	Aucune boiterie visible.
1	Boiterie intermittente ou inconstante, difficile à discerner, n'étant pas associée à des conditions précises.
2	Boiterie difficilement discernable au pas et au trot en ligne droite mais apparente et constante dans des conditions spéciales (cercle, inclinaison, surface dure, cheval monté).
3	Boiterie constante et évidente au trot et sous toutes les conditions.
4	Boiterie observée avec une asymétrie marquée au trot et au pas, coups de tête et/ou de hanche marqués.
5	Boiterie évidente, très peu ou pas d'appui au repos et en mouvement, réticence au mouvement.

**Tableau 1 :** Gradation des boiteries selon l'American Association of Equine Practitioners.

Quelle que soit l'échelle de gradation utilisée, hormis pour le cinquième grade qui est irréfutable, c'est une analyse subjective qui dépend de l'observateur. Certains praticiens complètent cette échelle par des demi-gradations afin de rendre cette gradation plus précise. L'important est de conserver une constance d'évaluation quelle que soit la méthode sélectionnée.

### **c) Identification du/des membre(s) boiteux**

Au cours de l'observation 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) [7]. Le caractère symétrique du trot facilite l'identification du membre boiteux, le galop étant lui, plus particulièrement pertinent pour l'étude de la souplesse de la colonne vertébrale et du déplacement des membres postérieurs [8].

#### **(1) Boiterie d'appui / boiterie de soutien**

Les boiteries sont de plusieurs natures en fonction de la phase de la foulée impliquée. Une boiterie d'appui est induite par une douleur causée par le poser du membre et donc le report du poids sur ce membre. Les signes les plus caractéristiques de ce type de boiterie sont un défaut du poser du membre, un raccourcissement des foulées, une phase d'appui plus courte ainsi qu'une modification de la trajectoire des membres [2]. Une boiterie de soutien est induite pas une douleur causée par la mobilisation d'une articulation, les signes les plus caractéristiques sont un raccourcissement de la phase aérienne et un défaut de protraction. La distinction entre ces boiteries n'est pas évidente et nécessite un observateur expérimenté.

#### **(2) Boiterie simple / boiterie à sièges multiples**

Une boiterie a pour origine une douleur ou une gêne traduite par une anomalie de locomotion. Elle peut être causée par une lésion localisée, alors qualifiée de boiterie simple, ou causée par des lésions multifocales impliquant également des phénomènes compensatoires, qualifiée de boiterie à sièges multiples. La complexité du diagnostic d'une boiterie est dans l'identification du ou des sièges de l'anomalie. L'observation du balancier

cervico-céphalique est utile dans l'identification d'une boiterie antérieure tandis que les boiteries postérieures seront plutôt repérées par l'asymétrie des mouvements de bassin induites par le poser des membres pelviens [9]. Une attention particulière doit être portée à la descente des boulets car une modification de la répartition des charges sur les membres entraîne un différentiel dans la descente des boulets à l'appui [2]. Lors de boiteries à la fois antérieure et postérieure, des phénomènes compensatoires variés apparaissent et les manifestations dynamiques deviennent alors plus complexes.

#### **d) Examens complémentaires**

Les examens complémentaires sont de plus en plus réalisés en routine car ils apportent des informations essentielles sur la nature et l'étendue de la lésion. Cela permet d'avoir une meilleure vision de l'évolution que peut prendre la boiterie ainsi que d'avoir une idée du pronostic sportif du cheval.

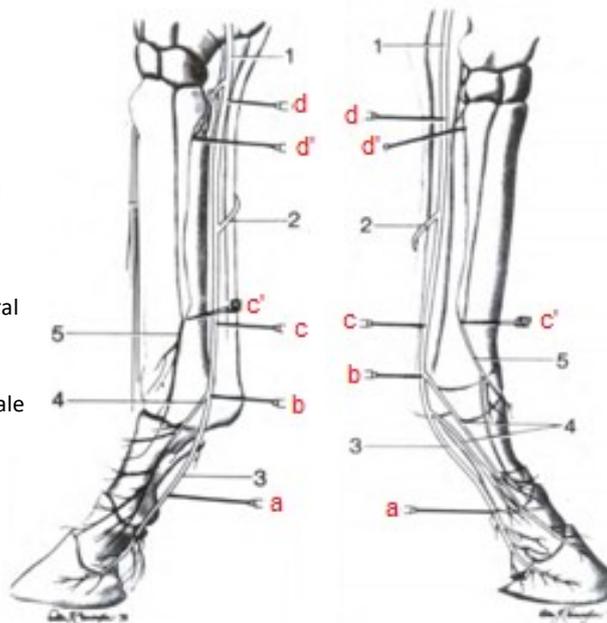
Les premiers examens complémentaires réalisés sont les anesthésies locorégionales diagnostiques. Il existe quatre étages d'anesthésie qui vont permettre de localiser plus précisément l'origine de la boiterie. Les anesthésies sont toujours réalisées de façon ascendante de distal vers proximal afin d'éviter les interférences entre elles ce qui entrainerait un biais dans leur interprétation [10].

Anesthésie	Nerfs anesthésiés	Zones anesthésiées	Partiellement anesthésiées
Digitale distale	Nerfs digitaux palmaires	Pied sauf partie dorso-proximale	Articulation P2-P3 et P1-P2  Partie distale de l'appareil suspenseur du boulet
Digitale proximale	Nerfs digitaux palmaires avec rameaux intermédiaires et dorsaux	Ensemble du pied et paturon	Région du boulet (possible si diffusion)
Métacarpienne (tarsienne) distale : quatre points basse	Nerfs palmaires et nerfs métacarpiens palmaires	Pied, paturon et boulet	Pénétration de l'articulation ou de la gaine digitale possible
Métacarpienne (tarsienne) proximale : quatre points hautes	Nerfs palmaires et métacarpien	Idem + Canon + tout l'appareil suspenseur du boulet	Pénétration de l'articulation ou de la gaine digitale possible

**Tableau 2 : Descriptif des différentes anesthésies locorégionales possibles [11].**

**Légende :**

1. Nerf palmaire latéral
  2. Branche communicante
  3. Rameau palmaire du nerf digital latéral
  4. Rameau dorsal du nerf digital latéral
  5. Nerf métacarpien palmaire latéral
- a. Anesthésie digitale distale  
b. Anest. dig. proximale  
c, c'. Anesthésie métacarpienne distale  
d, d'. Anest. métacarp. proximale



**Légende :**

1. Nerf palmaire médial
  2. Branche communicante
  3. Rameau palmaire du nerf digital médial
  4. Rameau dorsal du nerf digital médial
  5. Nerf métacarpien palmaire médial
- a. Anesthésie digitale distale  
b. Anest. dig. proximale  
c, c'. Anesthésie métacarpienne distale  
d, d'. Anest. métacarp. proximale

**Figure 1 : Schémas récapitulatifs des sites d'anesthésie diagnostique sur un membre thoracique. Latéral à gauche, médial à droite. [12]**

Une fois la région douloureuse identifiée, l'examen d'imagerie prend le relais et va être déterminant pour pouvoir poser un diagnostic lésionnel [11].

Sur les clichés radiographiques, ce sont les lésions de types ostéo-articulaires qui vont être recherchées tels que les fractures, tout signes d'arthropathie dégénératives, d'ostéolyses ou de dégénérescence cartilagineuse. Une attention particulière sera portée à l'os naviculaire dans le cas de boiterie distale car il fréquemment impliqué dans un syndrome récurrent impliquant l'appareil podotrochléaire. L'épaisseur de sole ainsi que l'alignement de la troisième phalange sont également appréciables sur une radiographie de pied de profil.

L'échographie sera utilisée en cas de lésions des tissus mous et de suspicion de lésions tendineuses ou ligamentaires. En cas de gonflement diffus, c'est un examen important pour l'identification des structures impliquées dans la distension. Cependant, l'examen échographique a une limite de portée dans les régions plus profondes du pied et on devra donc, dans ces cas-là, plutôt s'orienter vers un examen par imagerie à résonance magnétique. Le coût de cet examen est non négligeable mais c'est l'examen de choix lors de lésions profondes au sein de la boîte cornée. On favorisera l'utilisation de l'IRM qui peut permettre la mise en évidence un éventuel œdème osseux et des lésions des tissus mous, à l'inverse du scanner qui donnera principalement des informations sur les structures osseuses.

## **2. Dans le cadre d'une compétition d'endurance**

En endurance, l'évaluation de l'allure des chevaux fait partie intégrante de la discipline. Elle est indispensable pour l'appréciation du bien être des chevaux et aura des répercussions sur les résultats finaux. En compétition, les chevaux sont sollicités sur de longues distances mobilisant de façon intense l'ensemble du système locomoteur. Une asymétrie de l'allure peut refléter une douleur musculosquelettique, un dysfonctionnement métabolique ou un mal être global qui pourrait s'aggraver et provoquer de sévères lésions si le cheval était soumis à un exercice plus intense. Nagy *et al.* ont réalisé une étude

rétrospective entre 2008 et 2011 afin de comparer les différentes causes d'élimination en course internationale d'endurance [13]. Ils ont montré que la principale cause d'élimination lors de courses d'endurance était liée à une allure asymétrique du cheval. L'évaluation de ces boiteries qui peuvent être de faible grade est donc d'une grande importance dans cette discipline.

En fonction du niveau de l'épreuve, le règlement de la FFE et de la FEI peut différer mais les contrôles vétérinaires sont obligatoires avant le départ et durant la course. Ces contrôles ont pour objectif de valider la capacité d'un cheval à partir sur une course ou à la poursuivre. Ils sont décomposés en deux parties, avec un examen de la fonction métabolique et un examen locomoteur [14].

En ce qui concerne l'examen locomoteur, il consiste en un examen global du cheval à l'arrêt puis à une observation, sur un aller-retour, du cheval au trot en ligne droite sur 40 mètres. Le règlement autorise un second aller-retour si le vétérinaire le demande. Suite au contrôle, le vétérinaire caractérise l'allure du cheval, trois possibilités sont envisageables : A en absence de boiterie, B pour un cheval asymétrique de façon irrégulière sur quelques foulées, C pour un cheval boiteux ou asymétrique de façon régulière et sur toutes les foulées.

Ces contrôles vétérinaires peuvent entraîner une élimination du couple si l'état physique du cheval est considéré comme insuffisant. Ils vont également conditionner le classement final [15]. Dans les épreuves à vitesse imposée, le mode de classement fait intervenir la valeur de la fréquence cardiaque finale du cheval. Le couple finaliste ne sera pas forcément celui qui aura franchi la ligne d'arrivée en premier, mais bien celui qui aura parcouru la distance imposée à la vitesse optimale tout en étant attentif à son cheval. Dans les épreuves à vitesse libre, le classement final se fait selon l'ordre de franchissement de la ligne d'arrivée sous réserve du contrôle vétérinaire final et de la validation par le président du jury. Le chronomètre ne s'arrête qu'après la réussite du contrôle vétérinaire. Le couple doit donc entrer dans l'aire de contrôle vétérinaire le plus rapidement possible, car le temps d'attente est comptabilisé dans le temps de course, mais avec une attente suffisante pour que la fréquence cardiaque du cheval redescende et ne soit pas éliminatoire.

Nous avons vu que l'examen locomoteur est un examen qui doit être standardisé pour pouvoir être reproductible. Il doit être méthodique et réfléchi dans l'ordre d'exécution des différentes étapes. Par exemple, il faut toujours commencer par examiner le côté sain avant le côté boiteux afin d'avoir une idée de la norme du cheval. De même, lors de la réalisation d'anesthésies locorégionales diagnostiques, il est important de commencer par l'anesthésie la plus distale avant de remonter étage par étage jusqu'à la plus proximale pour avoir une meilleure appréciation de la localisation de la lésion.

L'examineur doit rester le plus objectif possible ; cependant, une part de subjectivité est toujours présente. Il est, par conséquent, intéressant de se pencher sur la fiabilité de l'observation directe via un examineur dans l'évaluation des boiteries du cheval.

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

L'évaluation d'une boiterie est opérateur dépendant et l'expérience est le premier critère de divergence d'avis. En effet, la sensibilité d'observation du vétérinaire est de plus en plus fine au fur et à mesure de son exercice. Il s'améliore dans un premier temps dans l'examen statique, puis dans un second temps, dans l'examen dynamique. Il perfectionne l'acquisition d'informations et leurs interprétations. Il a été montré une plus grande concordance de diagnostic entre des observateurs expérimentés qu'entre des vétérinaires plus novices, ce qui constitue une partie du biais de l'examen subjectif. Il a également été mis en évidence que plus la boiterie était de faible grade plus la divergence de diagnostic était importante.

Plusieurs études ont été effectuées dans le but de faire une estimation de la fiabilité de l'évaluation de boiteries par observation directe.

Keegan en 2010, a étudié la corrélation entre les avis de différents vétérinaires vis-à-vis du diagnostic d'un cheval considéré boiteux [16]. L'intérêt de cette étude était de montrer qu'une approche avec une méthode plus objective serait bénéfique pour le diagnostic de boiterie sur le terrain. Un total de 131 chevaux a été examiné par plusieurs vétérinaires, chaque cheval ayant été évalué en moyenne 3,2 fois. Le premier examen était uniquement visuel sur un cheval au trot en ligne droite, chaque vétérinaire devait attribuer la mention cheval boiteux ou non boiteux. Un examen plus approfondi était ensuite effectué avec examen locomoteur complet comprenant différents tests de flexion et mise en longe afin de quantifier la boiterie à l'aide de l'échelle de score AAEP. Les vétérinaires identifiaient ensuite le membre qui leur paraissait le plus affecté et réévaluaient la boiterie avec l'échelle AAEP.

Les résultats de cette étude ont montré que les boiteries diagnostiquées avec un score AAEP supérieur à 1,5 avaient un taux de concordance entre les avis vétérinaires de 44% tant dis que celles associées à un score AAEP inférieur ou égal à 1,5 le taux était seulement de 16%. Cela met en évidence une divergence d'avis supérieur à 50% et cette divergence était d'autant plus significative que le degré de boiterie était faible. Il a, de plus, été mis en évidence que les avis vétérinaires sur les boiteries antérieures étaient plus convergents que ceux pour les boiteries des membres postérieurs. La réalisation des tests de flexion ne semblait cependant pas augmenter le taux d'accord entre les vétérinaires dans ce cas.

Hammarberg *et al.* s'est concentré sur l'observation du cheval en longe [5]. En effet, la mise en longe du cheval est une part importante dans l'examen locomoteur car la trajectoire circulaire peut accentuer les boiteries de faible degré. Cependant comme nous l'avons vu précédemment, en cercle, la symétrie du mouvement vertical est systématiquement affectée et les mouvements asymétriques sont exacerbés. De plus des mouvements compensatoires sont présents. La taille du cercle et la vitesse du cheval vont aussi affecter la symétrie du mouvement. Tous ces paramètres rendent l'évaluation de la boiterie en longe difficile.

Ainsi, l'objectif de l'étude menée par Hammarberg était l'estimation de la concordance intra et inter vétérinaire évaluant des boiteries sur des enregistrements vidéos de chevaux en longe, sains et boiteux, et étudier l'influence de l'expérience du vétérinaire sur la

concordance des avis. Pour cela, 23 chevaux ont été sélectionnés pour réaliser des enregistrements au trot. Leur allure a été analysée à l'aide d'un capteur inertiel accélérométrique. Les chevaux étaient examinés en ligne droite et en cerce sur sol mou et sol dur. Une vidéo a été réalisée pour chaque condition et le cheval a été classé en fonction du type de boiterie : boiterie antérieure, boiterie postérieure ou cheval sain, déterminé objectivement sur l'enregistrement au trot en ligne en se basant sur la symétrie de l'allure.

Un total de 86 vétérinaires équinés dont 43 ayant moins de 5 ans d'expérience en pathologie locomotrice ont participé à l'étude, visualisant chacun 60 vidéos et avec une possibilité de répétition de visionnage. La concordance des avis de chaque vétérinaire et entre les vétérinaires a été mesurée. Les résultats montraient une concordance inter-évaluateur plus élevée pour les boiteries antérieures que pour les boiteries postérieures et que pour les chevaux sains. La médiane de la concordance intra évaluateur était de 0,57.

La conclusion est similaire à celle décrite par Keegan *et al.* à savoir que la concordance inter évaluateur était faible pour les évaluateurs peu expérimentés et pour tous les évaluateurs lorsqu'il s'agit d'une boiterie postérieure [16].

L'identification du membre boiteux est primordiale pour le diagnostic, le succès du traitement et de la récupération. La variabilité inter individuelle des évaluateurs lors d'examen en longe va avoir une conséquence sur le caractère répétable de l'examen et donc indirectement sur l'efficacité du traitement. La conclusion de cette étude va en faveur de l'utilisation de méthodes objectives complémentaires dans l'objectif d'obtenir un diagnostic plus juste et plus précis.

Par ailleurs Lopes *et al.* ont étudié la faisabilité de la détection et la quantification d'une allure irrégulière à l'aide de capteurs inertiels de locomotion lors de courses d'endurance [17]. Pour cela, ils ont comparé les résultats des évaluations locomotrices réalisées par des vétérinaires de la Fédération Equestre Internationale et des enregistrements de capteurs de locomotions (Lameness locator) au cours de 2 courses d'endurance différentes (40km et 80km). Un total de 70 enregistrements a été réalisé sur 22 chevaux.

Pour la quantification du degré de boiterie et l'identification du membre affecté, les auteurs se sont basés sur l'asymétrie des mouvements verticaux de la tête du cheval enregistré par les capteurs. Les vétérinaires et cavaliers ont, par ailleurs, dû répondre à un questionnaire sur l'utilisation des capteurs afin d'avoir un retour sur leur avis.

Chaque enregistrement contenait 4 séquences de foulées au trot et l'analyse des données commence par la sélection des foulées exploitables. Différents paramètres ont été calculés comme les valeurs moyennes des hauteurs minimales ou maximales de chaque signal, respectivement Mindiff et Maxdiff. Ces deux paramètres sont comparés à un seuil établi et ont permis d'objectiver une boiterie antérieure ou postérieure. Les boiteries détectées par les capteurs ont été gradées et qualifiées en fonction des valeurs obtenues : discrètes quand la valeur absolue de Maxdiff (ou Mindiff) était inférieure au seuil mais de moins de 2 fois le seuil, et modérées à sévères lorsque la valeur absolue de Mindiff ou Maxdiff était au moins deux fois supérieure au seuil.

Les résultats montraient que les capteurs ont détectés 48 boiteries sur les 70 enregistrements effectués alors que seulement 3 chevaux sur les 22 ont été éliminés par les vétérinaires pour cause de boiterie. La discordance entre les résultats obtenus avec les capteurs et l'avis des vétérinaires était importante mais après diminution de la sensibilité des capteurs en assimilant les asymétries détectées de faibles grades comme des chevaux non boiteux, la discordance a été réduite.

Ces résultats mettent en évidence les limitations humaines face à la détection de boiterie de faible grade [18]. Ceci est dû à la résolution spatiale et temporelle insuffisante de la vision humaine ainsi que la présence de biais entre les évaluateurs. La détection d'allure asymétrique basée uniquement sur la méthode subjective peut également être influencée par la vitesse des chevaux, un port de queue trop haut rendant plus difficile la visualisation des mouvements du bassin ou les illusions d'optiques créées par des asymétries de bassins ou les colorations de la robe, en particulier par les balzanes. L'expérience de l'évaluateur est également une source de biais comme il a pu être montré dans des études précédentes. De plus, lors de course d'endurance, l'examen locomoteur est restreint et seule une brève

palpation et inspection sont permises rendant l'évaluation d'autant plus dépendante de l'évaluateur.

Il serait intéressant de réaliser de nouvelles études afin d'avoir une vision plus précise de la signification clinique d'une allure asymétrique de faible degré et de pouvoir établir un seuil raisonnable d'élimination lors des courses d'endurances. Les capteurs sont, en effet, extrêmement sensibles et peuvent mettre en évidence une asymétrie de l'allure sans que celle-ci n'ait d'incidence clinique sur le cheval et ne compromette ses performances. En cas d'utilisation sur le terrain, il serait donc important d'en tenir compte.

Le bilan de ces études suggère que l'évaluation subjective d'une boiterie par un praticien, même expérimenté, ne doit pas être la seule référence lorsque les conclusions dépendent du grade attribué à cette boiterie. Il a été démontré que l'examen locomoteur traditionnel est un examen subjectif et c'est vers une méthode d'analyse plus objective que convergent les différentes études présentées ci-après.

## **II. Les différentes méthodes objectives d'étude de la locomotion du cheval**

L'analyse objective de la locomotion du cheval est en expansion et de plus en plus de méthodes sont proposées. De nombreux auteurs se sont penchés sur cette approche, on peut en citer quelques-uns comme Barrey, Halling, Pourcelot ou Clayton. La majorité d'entre eux ne travaille que sur l'analyse du trot et nous allons en comprendre les raisons.

### **A. Intérêts de l'étude de la locomotion du cheval au trot**

Le trot est l'allure privilégiée pour l'étude quantitative de la locomotion du cheval. C'est une allure symétrique dite sautée par bipède diagonal. Les diagonaux gauche et droit viennent se poser au sol successivement, séparés de temps de suspension. Il y a donc deux phases d'appui séparées par deux phases de soutien par foulée [19].

La phase d'appui correspond à la période de contact du pied avec le sol, donc du poser au lever. La phase de soutien ou de suspension, correspond aux moments où le pied n'est plus au contact du sol. La phase d'appui d'un diagonal se réalise entièrement pendant la phase de soutien du diagonal opposé.

Ainsi dans le cas d'une boiterie, la locomotion va être altérée et il y aura des répercussions sur l'allure du cheval. Lors d'une analyse cinétique, le tracé de l'enregistrement de l'allure sera asymétrique et l'interprétation sera facilitée en comparaison à un enregistrement au pas ou au galop.

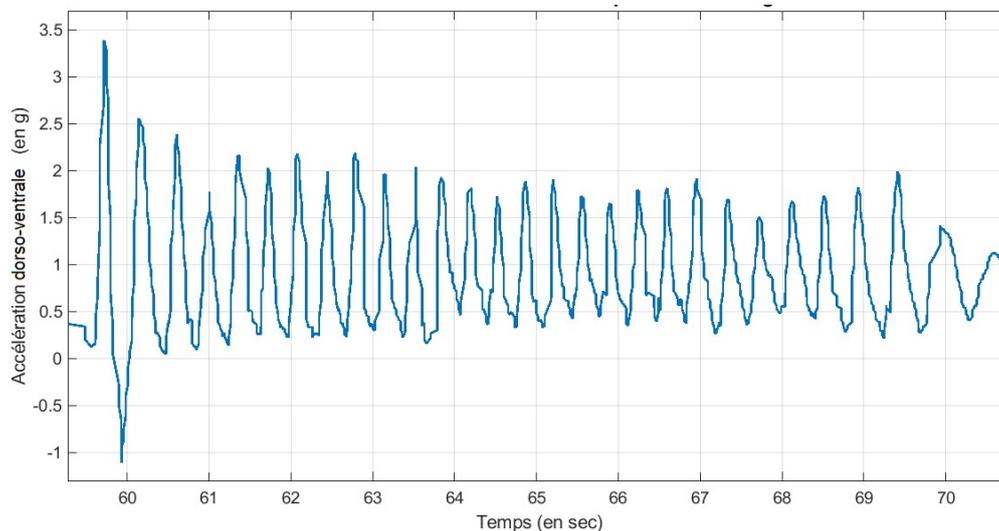
#### **1. Etude des mouvements**

Buchner *et al.* ont étudié les mouvements de tête, de garrot et de bassin de chevaux sur lesquels a été induite une boiterie antérieure ou postérieure [20]. Les mouvements des

différentes parties du corps du cheval, utiles au diagnostic de boiterie, sont décrits dans cette partie en se basant sur les résultats de l'étude de Buchner.

### a) Mouvements de la tête

Au trot, la tête suit un mouvement de balancier régulier, elle va monter et descendre deux fois sur une foulée ; une foulée étant composée de la succession du poser de chacun des diagonaux. Lorsque l'on enregistre les mouvements verticaux (dorso-ventraux) de la tête d'un cheval sain on obtient un tracé sinusoïdal illustrant ce balancier (Fig. 2).



**Figure 2 :** Tracé sinusoïdal de l'accélération dorso-ventrale de la tête du cheval sain au cours d'un trotting.

Lorsqu'un cheval présente un membre douloureux, il va tenter de le soulager. Dans le cas d'une boiterie antérieure, c'est le balancier de la tête qui sera le plus modifié [20]. En effet, lors du poser du diagonal impliquant le membre douloureux, le cheval va limiter la force appliquée sur ce membre en levant la tête de manière plus exagérée. Il va, de plus, souvent raccourcir la phase d'appui de ce diagonal. En conséquence, on va voir une exagération du mouvement de la tête vers le bas et une phase d'appui plus longue lors du posé du diagonal sain.

Cette altération de l'attitude du cheval traduit une douleur et c'est ce qui va permettre d'objectiver une boiterie. Dans ces conditions, lors de l'enregistrement accélérométrique de la composante verticale du mouvement de la tête d'un cheval, le tracé sera modifié et c'est à partir de l'analyse de cette courbe que nous pourrions quantifier de manière objective la boiterie.

### **b) Mouvements du garrot**

Le garrot suit également un mouvement régulier de balancier mais d'amplitude plus réduite que celui de la tête du cheval [20]. Ainsi, lors d'anomalie de locomotion, une répercussion moindre du tracé de la composante verticale du garrot sera observée.

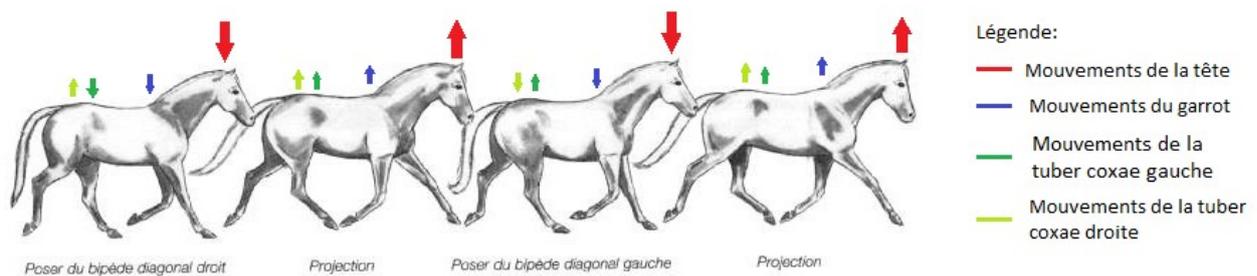
Le mouvement du garrot est directement lié à l'extension des boulets antérieurs du cheval. Lorsque le cheval diminue la charge portée sur son membre douloureux, l'extension de son boulet sera limitée alors qu'au contraire le membre controlatéral recevra une charge plus importante entraînant une augmentation de l'extension du boulet associé. Cette asymétrie distale du membre aura un impact sur le mouvement du garrot qui va suivre le balancier des membres. Ainsi, lors du poser du membre boiteux le garrot sera élevé tandis qu'il sera abaissé lors du poser du membre sain.

### **c) Mouvements du bassin**

Le bassin va suivre un mouvement de balancier induit par le poser des membres postérieurs. Il atteint une position minimale lors de la première phase d'appui du membre puis une position maximale induite par la propulsion du membre.

Lors d'une boiterie postérieure c'est le balancier des tuber coxae qui est le plus modifié [20]. La croupe s'abaisse à l'appui du membre douloureux et sera propulsé en hauteur à l'appui du membre sain, on observera donc des mouvements verticaux de la tuber coxae plus amples du côté membre boiteux en comparaison à celle du côté opposé [9].

En fonction de la nature de la boiterie, de poussée ou d'impact, on aura une modification différente du balancier. Dans le cas d'une boiterie de poussée, la hanche du côté douloureux atteindra une hauteur maximale inférieure à celle du côté opposé. A l'inverse dans le cas d'une boiterie d'impact, le cheval va limiter le poids appliqué sur ce membre et aura tendance à garder sa hanche plus en hauteur, elle atteindra donc une hauteur minimale supérieure à celle du côté opposé.



**Figure 3 :** Décomposition des mouvements de la tête, du garrot et des tubers coxae au trot.

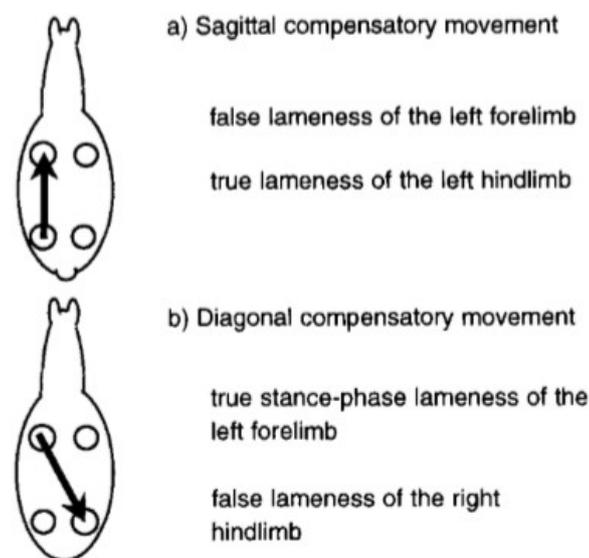
#### d) Compensations croisées entre les antérieurs et les postérieurs

Sur certains chevaux boiteux, il est possible d'observer deux boiteries, antérieure et postérieure, concomitantes qui sont en fait, dues à des phénomènes compensatoires [21].

Claudia Uhler a étudié les relations de compensations croisées entre les antérieurs et les postérieurs [22]. L'étude porte sur quatorze chevaux sur lesquels une boiterie était induite ou initialement présente. Se basant sur une méthode cinétique permettant d'enregistrer les variations d'accélération des mouvements de la tête et du bassin, il a été possible de quantifier les boiteries antérieures et postérieures avant et après suppression de la boiterie initiale. Les résultats ont montré que sur les 4 chevaux présentant une boiterie initiale postérieure, une boiterie compensatoire antérieure du membre ipsilatéral était

enregistrée, et que sur 6 des 10 chevaux présentant une boiterie antérieure, c'était une boiterie compensatoire du membre postérieur controlatéral qui était notée.

Cette étude montre qu'en cas de boiterie à sièges multiples, on peut déduire le membre douloureux en fonction de la répartition des boiteries dans l'axe sagittal ou diagonal. Sur un cheval ayant une boiterie antérieure sévère, on aura une boiterie induite du membre postérieur controlatéral et sur un cheval présentant une boiterie initiale postérieure, on aura une boiterie induite du membre antérieur ipsilatéral.



**Figure 4 :** Phénomènes compensatoires induits par une boiterie initiale (Uhlir *et al.* 1997).

Ce phénomène n'est pas systématique mais est à retenir en cas de doute sur la localisation de la boiterie ou en cas de boiteries antérieure et postérieure concomitantes. Ainsi, dans le cas d'un cheval avec une boiterie antérieure et postérieure du côté ipsilatéral, il est plus pertinent de commencer l'investigation par une anesthésie locorégionale diagnostique sur le membre postérieur car il est plus probable que la boiterie initiale soit localisée sur ce membre.

Dans le cas de vraie boiterie antérieure, seuls les grades sévères entraînent une boiterie compensatoire du membre postérieur controlatéral. Une des raisons possibles est que le balancier de la tête à lui seul permettrait une redistribution suffisante des forces pour

compenser les boiteries antérieures de faibles grades. Une autre raison possible est le fait que la tête soit bien plus mobile que l'os du sacrum et qu'il est donc plus évident de détecter une asymétrie cervico-céphalique que sacral et par conséquent de détecter la boiterie initiale antérieure plutôt que la boiterie postérieure compensatoire.

Nous pouvons en conclure que sur un cheval présentant une boiterie antérieure sévère concomitante à une boiterie postérieure controlatérale, il est plus pertinent de commencer l'investigation sur le membre antérieur car il est plus probable que la boiterie initiale soit localisée sur ce membre.

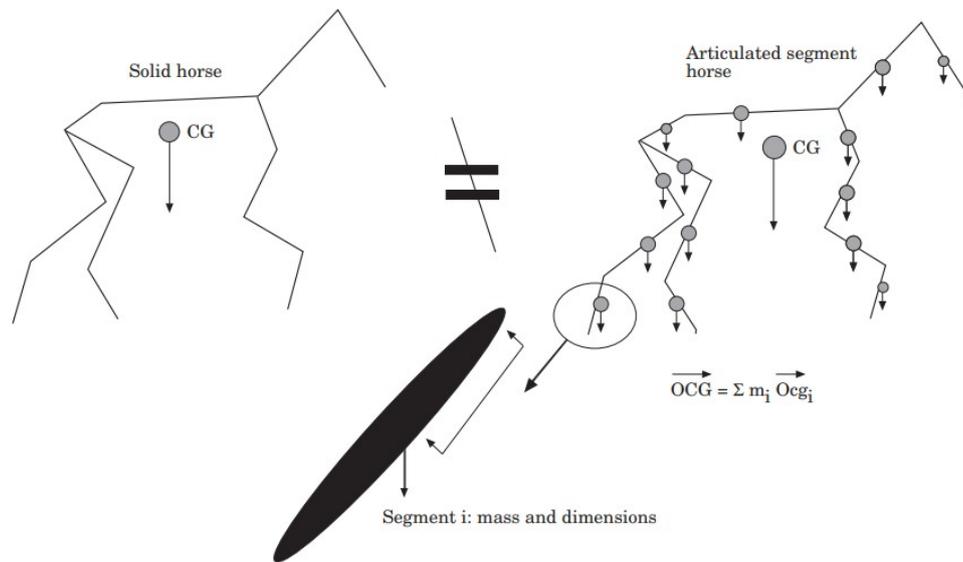
Dans un contexte de boiterie postérieure, il est également possible d'avoir une asymétrie du balancier céphalique avec une hauteur de tête plus basse lors du poser du diagonal boiteux. Cette attitude permet au cheval de porter son poids sur son antérieur et ainsi soulager son postérieur douloureux. Ainsi, l'étude du mouvement des différentes parties du corps utiles à l'examen et à faire dans sa globalité afin de différencier une boiterie primaire d'une boiterie compensatoire.

## **2. Principe général des méthodes objectives d'analyse de la locomotion**

Comme nous l'avons vu, lors d'une boiterie, une douleur ou une restriction de mouvement va se traduire par une asymétrie de l'allure ou de la foulée. Cette asymétrie n'est pas toujours visible mais des méthodes quantitatives existent permettant une approche plus objective de l'anomalie locomotrice.

Ainsi, dans l'optique d'une analyse plus objective de la locomotion du cheval, Barrey *et al.* ont admis que le squelette du cheval pouvait être considéré comme un modèle simple composé de segments articulés entre eux [23].

Par conséquent, le corps du cheval ainsi modélisé suit les mêmes lois de la mécanique qu'une série d'objets inertes. Cependant, ces lois sont à appliquer avec précaution car le squelette est un ensemble d'articulations ne pouvant pas être assimilé à un objet inerte seul mais bien régi par les lois de la mécanique ainsi que par la mécanique newtonienne.



**Figure 5 :** Cheval modélisé en différents segments articulés ensemble. Barrey, 1999.

L'étude objective de la locomotion nécessite donc la mise en jeu de deux études complémentaires : l'étude cinématique et l'étude cinétique.

L'étude cinématique est l'étude de la position dans l'espace d'un segment sur un intervalle de temps donné. Les déplacements sont décrits quantitativement par des variables linéaires et angulaires en relation au temps, au déplacement, à la vitesse et à l'accélération.

L'étude cinétique est l'étude de la cause du mouvement, qui peut être attribué aux forces appliquées au corps, la distribution des masses et leurs dimensions. La cinétique prend en compte les forces, les énergies et le travail des forces qui sont également en relation avec les variables cinématiques telles que l'accélération et la vitesse.

## **B. Les méthodes cinématiques**

### **1. Le principe**

L'étude cinématique de la locomotion se base sur l'analyse d'image du cheval en déplacement. C'est l'étude de la position dans l'espace sur un temps donné d'une partie du corps. Une ou plusieurs caméras peuvent être utilisées afin d'obtenir un enregistrement permettant l'analyse de la dynamique du cheval.

Différentes parties du corps sont ciblées, leurs mouvements et trajectoires sont étudiés, l'objectif étant de faire une description et une analyse précise du mouvement du cheval. Les déplacements sont décrits quantitativement par des variables linéaires et angulaires en relation au temps, au déplacement, à la vitesse et à l'accélération. Les mesures de l'analyse cinématique sont des variations temporelles de mesures linéaires ou bien angulaires des différentes parties ciblées du cheval [24].

### **2. La mise en place des tests**

Les enregistrements peuvent être réalisés en 2 dimensions ou en 3 dimensions, dans le premier cas une seule caméra suffit, dans le second, un minimum de 2 caméras sont nécessaires et jusqu'à quatre dans les systèmes les plus puissants permettant l'analyse des mouvements des deux côtés du cheval [25]. Les enregistrements étaient d'abord réalisés sur piste expérimentale avec des caméras fixes permettant la capture d'un nombre restreint de foulées. L'enregistrement par des caméras embarquées suivant le cheval en mouvement a permis d'augmenter le nombre de foulées enregistrées et donc d'élargir le champ d'étude [26].

Un système d'enregistrement fixe centré sur un cheval sur tapis roulant a été mis en place et a permis d'avoir accès à un nombre de données bien plus important. L'avantage de ce système est le contrôle des paramètres tels que la vitesse, l'inclinaison ou même l'environnement, rendant ainsi possible la reproductivité et la standardisation des

enregistrements. Cependant, lors de l'utilisation d'un tapis roulant, il est important de prendre en compte le fait que le cheval doit être habitué à l'exercice et c'est seulement après plusieurs sessions que le cheval adopte une allure constante et régulière permettant l'exploitation des données enregistrées.

Des différences majeures entre la locomotion des chevaux sur piste expérimentale et sur tapis roulant ont été mises en évidence par des études comparées [16],[27]. Les modifications observées sur tapis roulant étaient, la durée de la phase d'appui et les altérations de la phase caudale de la foulée. Il a été montré que sur tapis roulant la durée de la phase d'appui des antérieurs est augmentée en comparaison à un déplacement sur piste d'entraînement. De plus, la phase caudale de la foulée s'est révélée augmentée pour les antérieurs et les postérieurs tandis qu'aucune différence de la phase de protraction n'a été mise en évidence. La régularité de l'allure est améliorée sur le tapis roulant mais les mouvements verticaux de la ligne du dos sont diminués et les foulées allongées [28].

Chacun de ces supports présente des avantages différents et le bilan de cette étude montre que le choix entre les deux est à faire en relation avec l'étude menée. Le principal avantage de la piste d'entraînement est la liberté de mouvement du cheval qui peut se déplacer sans restriction. Le principal avantage du tapis roulant est la possibilité de contrôle des paramètres extérieurs apportant un caractère répétable aux tests effectués.

### **3. La capture d'image**

Le cheval est, au préalable, munis de marqueurs placés sur des parties du corps choisies pour l'étude. Les marqueurs peuvent être placés sur les pieds, les articulations ou sur la nuque en fonction de l'enregistrement recherché. Ces marqueurs doivent être facilement repérables, ils sont donc souvent constitués de points blancs ou lumineux. Les marqueurs étant fixés sur la peau, les mouvements de celle-ci, principalement au niveau des articulations, créent des artefacts à prendre en compte lors de l'exploitation des enregistrements. Les données cinématiques fournissent des informations concernant le

déplacement des différents marqueurs en fonction du temps. L'analyse du déplacement doit ensuite permettre d'apprécier la symétrie des mouvements.

La méthode cinématique permet une étude précise de la locomotion des chevaux et, dans le cadre de l'analyse des boiteries, c'est un atout pour la description des anomalies locomotrices induites par les différents types de boiteries. Cependant, cette méthode nécessite un matériel très coûteux, une capacité de stockage très importante, des traitements de données fastidieux ainsi que des réglages et des étalonnages fréquents et complexes. C'est une méthode par conséquent difficilement applicable sur le terrain.

## **C. Les méthodes cinétiques**

Le principe de la méthode cinétique est l'analyse des forces extérieures appliquées au corps en mouvement. Il existe plusieurs possibilités mais toutes utilisent un système de capteurs électroniques. L'analyse peut se concentrer sur les forces de réactions au sol au moment du poser du pied [29], ou sur les forces de déplacement en étudiant les différentes accélérations appliquées sur le cheval en mouvement.

### **1. L'enregistrement des forces de réaction du sol**

Pour enregistrer les forces de réactions du sol, les capteurs utilisés peuvent être mis en place sur une plateforme au sol ou directement fixés sur le sabot. L'utilisation de la plateforme permet de renseigner sur l'amplitude de la force et de son orientation [30]. Cependant, elle présente une surface de détection faible et nécessite un contrôle visuel de la trajectoire du pied ce qui présente une limite à l'utilisation de ce système.

L'étude des forces de réaction au sol présente un intérêt car il a été montré, sur divers types de boiterie, qu'une modification de ces forces de réactions est présente sur le membre lésé et sur le membre compensatoire. Clayton et Schamhardt ont étudié les modifications de ces

forces lors de tendinites induites du tendon fléchisseur superficiel du doigt. Ils ont ainsi mis en évidence une réduction importante de la force de réaction du sol dans la première moitié de la phase d'appui du membre boiteux en comparaison avec le membre controlatéral dit compensatoire [29]. Cela concorde avec le fait que la contrainte sur le tendon augmente de façon importante sur la première partie de la phase d'appui et est maximale au milieu de cette phase. Cette étude montre l'intérêt de l'étude cinétique avec plateforme dans l'étude de la nature de la boiterie. Cependant, bien qu'elle présente de nombreux avantages dans la précision des mesures et l'apport d'informations, c'est une analyse compliquée à mettre en place nécessitant un matériel complexe et coûteux rendant son utilisation impossible sur le terrain.

Plusieurs auteurs ont cherché à mettre au point des systèmes d'enregistrement fixés sur le sabot du cheval, ces systèmes étaient moins sensibles que l'enregistrement sur plateforme mais permettaient des enregistrements dans différentes conditions [23].

## **2. L'utilisation de l'accélérométrie**

Comme nous l'avons vu pour les forces de réactions au sol, lors d'une boiterie, la répartition de ces forces, tout comme le centre de gravité du cheval, sont modifiés ce qui provoque une asymétrie de l'allure. Il est également possible d'observer une asymétrie dans l'accélération et la décélération du corps durant chaque demi-foulée. Ainsi les accélérations selon les différents axes : dorso-ventral, médio-latéral et cranio-caudal, peuvent être mesurées à l'aide d'accéléromètres.

### **a) Principe de l'accélérométrie**

La mesure de l'accélération du cheval est réalisée à l'aide de capteurs inertiels fixés sur différentes parties du corps. Ces capteurs sont munis d'accéléromètres qui mesurent les changements instantanés de vitesse sur un intervalle de temps donné, cela correspond à l'accélération à laquelle est soumis le corps en mouvement. Le vecteur accélération est proportionnel à la résultante des forces appliquées sur la partie du corps où le capteur est

fixé. Le calcul de la double intégrale de l'accélération linéaire, en prenant certaines précautions protocolaires, permet d'estimer le déplacement linéaire ou angulaire instantané [23]. L'analyse accélérométrique est considérée comme vraiment sensible pour la détection de légers changements cinétiques dans la locomotion du cheval. Elle a été utilisée dans plusieurs études expérimentales ([31] ; [32]).

La technologie ne cesse de s'améliorer proposant des capteurs accélérométriques à faibles coûts et de plus en plus petits et légers. Ce sont des systèmes performants facilement accessibles et adaptés au travail sur le terrain.

Les limites de l'analyse accélérométrique sont l'environnement et la reproductibilité. En effet, à la fois les capteurs sont pratiques et légers donc très adaptables à tous types de terrain facilitant les expérimentations mais il faut savoir rester prudent sur les protocoles car des interférences comme l'attitude du cheval peuvent interférer dans les résultats.

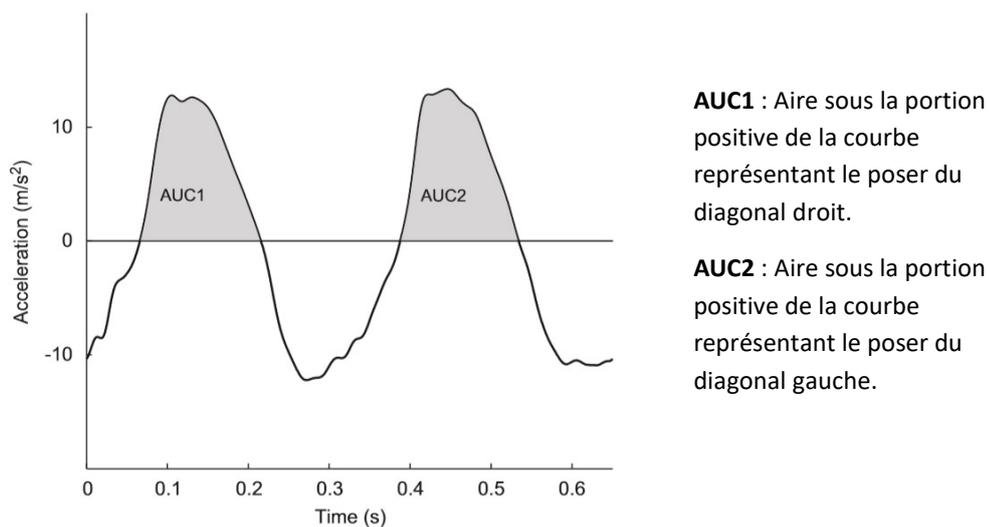
### **b) Application de l'accélérométrie**

Barrey et Desbrosse ont étudié la pertinence de l'analyse accélérométrique en pratique vétérinaire [33]. En se basant sur 26 chevaux boiteux, ils ont comparé, pour chaque cas, le diagnostic établi par le praticien et le résultat de l'analyse accélérométrique. Les paramètres étudiés étaient la fréquence, la symétrie et la régularité de foulée ainsi que le diagonal sur lequel le cheval charge le plus de poids au pas et au trot. Ils ont montré que dans la majorité des cas les résultats accélérométriques et le diagnostic de boiterie étaient concordants. La symétrie de l'allure et la régularité sont modifiées en corrélation avec le degré de boiterie.

Les boiteries plus subtiles, avec des degrés inférieurs ou égaux à 1 étaient souvent détectées au pas par diminution de la régularité et de la symétrie de la foulée tandis qu'au trot, seule la régularité semblait affectée. Certains chevaux sains ont été détectés asymétriques en particulier au pas, cela met en évidence la difficulté dans la définition de la limite entre asymétrie physiologique et asymétrie pathologique.

Pour l'identification du membre boiteux, plusieurs analyses sont possibles. Dans la majorité des études, il est déduit de l'analyse de l'accélération latéro-médiale [34]. En effet, l'accélération maximale a lieu au début de la phase de poser du membre. Elle détermine également la composante latérale de la force appliquée au centre de gravité indiquant ainsi le diagonal à l'appui. Dans le but de soulager le membre douloureux, le cheval va automatiquement modifier sa locomotion en diminuant les composantes latérale et verticale de la force appliquée.

D'autres auteurs comme Halling et Thomsen ont défini des indices de symétries qualifiant l'allure en se basant uniquement sur le signal dorso-ventral [32]. Un des indices définis est la symétrie de charge entre les deux diagonaux (indice A) permettant ainsi de connaître la latéralisation de la boiterie. Pour une foulée, le signal de l'accélération dorso-ventral lissé par la loi de Fourier contient deux portions positives qui reflètent les forces de réaction du sol agissant respectivement sur le diagonal droit et le gauche (Fig. 6).



**Figure 6** : Signal de l'accélération dorso-ventrale lissé par la loi de Fourier d'une foulée sur un cheval non boiteux (Halling, 2010).

Un cheval boiteux va diminuer les forces appliquées sur le diagonal douloureux ainsi l'aire sous la partie positive de la courbe correspondant à ce diagonal sera diminuée. L'indice de symétrie A est donc défini comme le logarithme du quotient des aires sous les parties positives du signal dorso-ventral.

$$A = \log\left(\frac{AUC_1}{AUC_2}\right)$$

Un cheval sain aura donc une valeur A aux alentours de 0, un cheval boiteux à droite aura une valeur A négative et un cheval boiteux à gauche aura une valeur A positive. Ainsi, cet indice donne une information sur le diagonal atteint.

Une des limites de cette méthode objective d'évaluation de la locomotion est la qualité du sol [17]. En effet, en extérieur, le terrain peut présenter des irrégularités pouvant avoir un impact sur les résultats d'enregistrements induisant une asymétrie non associée au cheval. Aucune publication n'a été réalisée sur ce sujet mais il paraît plausible qu'un sol irrégulier puisse engendrer des anomalies d'allures uniquement liées à sa nature. Ce paramètre pourrait donc affecter l'efficacité de l'évaluation par les capteurs accélérométriques. Il est évident que la nature du sol peut également avoir une influence visuelle sur l'allure du cheval pouvant fausser le diagnostic. Cependant, les évaluateurs sont capables de prendre en considération ces défauts de terrains contrairement aux systèmes objectifs de mesure. Ainsi quelle que soit la méthode objective utilisée elle ne peut être dissociée de l'analyse d'un observateur expérimenté.

### c) Critères d'évaluation d'une boiterie en accélérométrie

Différents critères d'évaluation peuvent être sélectionnés en accélérométrie ; en nous appuyant sur l'étude effectuée par Keegan en 2010 nous allons développer une approche possible [35].

Les mouvements verticaux de la tête du cheval sont fortement influencés par la symétrie du poser des antérieurs. Par conséquent, une irrégularité des membres antérieurs sera reflétée par un mouvement exagéré de la tête. L'analyse cinétique du mouvement vertical de la tête du cheval va permettre de quantifier de manière objective la boiterie. Cette méthode suppose que le mouvement dorso-ventral peut être décomposé en 3 composantes : le mouvement vertical causé par la boiterie (A1), l'amplitude du mouvement vertical biphasique normal de la tête (A2) et les mouvements parasites de la tête qui peuvent être dû à l'excitation ou à de la nervosité. Dans son étude, Keegan a exclu cette dernière de l'analyse et a mis en évidence que, lors de l'induction d'une boiterie, A1 variait mais A2 restait identique.

Une analyse cinématique du mouvement a permis de montrer que la tête atteint une hauteur maximale juste avant le poser du pied sur le sol et une hauteur minimale à mi-parcours du poser du pied. Une foulée est composée de deux balancements haut/bas de la tête.

L'étude cinétique du mouvement de la tête d'un cheval sain montre un mouvement sinusal régulier et symétrique et c'est l'apparition d'une asymétrie du signal qui permet de mettre en évidence une boiterie. Lors d'une boiterie unilatérale, le mouvement descendant de la tête va être diminué au poser du membre douloureux.

Dans le cas de boiteries de faibles grades ou intermittentes, il est important de travailler avec des valeurs moyennes établies sur plusieurs foulées car la nature asymétrique du mouvement vertical de la tête lors de ce type de boiterie n'est pas forcément retrouvée sur toutes les foulées.

Pour son étude, Keegan a associé une analyse cinétique et cinématique du mouvement sur des chevaux auxquels il a induit une boiterie légère de l'antérieur droit. Il a mesuré la différence de hauteur minimale de la tête entre le posé du diagonal droit et du diagonal gauche pour chaque foulée, appelé POLMIN. La valeur moyenne de chaque enregistrement

est utilisée comme indice de boiterie en comparant les moyennes obtenues avant et après l'induction de la boiterie. La distinction entre le latéral droit et le gauche est permise par l'évaluation de la hauteur d'un marqueur fixé sur le sabot de l'antérieur droit.

A l'issue de cette étude, Keegan montre qu'après induction de la boiterie, la valeur moyenne de POLMIN de l'ensemble des chevaux augmentait significativement. Ainsi, l'analyse des POLMIN est intéressante pour objectiver une boiterie, mais il est nécessaire de prendre des précautions car les mouvements parasites interfèrent sur ces valeurs et peuvent fausser les résultats.

Une étude similaire a été réalisée en 2016 se concentrant uniquement sur les mouvements des postérieurs. Cette étude menée par Bragança *et al.* a montré que le pourcentage d'erreur d'interprétations était plus important sur l'enregistrement des postérieurs que sur l'enregistrements des antérieurs [36].

Rhodin en 2018, a émis l'hypothèse que l'on pouvait utiliser le mouvement du garrot pour faire la distinction entre une asymétrie de mouvement de tête causé par une boiterie antérieure et un mouvement de tête compensatoire causé par une boiterie postérieure primaire [37]. Il a pu valider son hypothèse en réalisant une étude accélérométrique sur dix chevaux enregistrés sur tapis roulant auxquels a été induit de façon aléatoire, une boiterie antérieure ou postérieure. Comme nous l'avons vu précédemment, en fonction de la localisation de la boiterie, les modifications des mouvements des différentes parties du corps étudiées seront différentes. Sur une boiterie postérieure primaire, lors du poser du membre boiteux le tronc maintient une position haute tandis que la tête s'abaisse pour charger l'antérieur controlatéral et soulager le postérieur. Le garrot va également s'élever de manière plus importante du côté controlatéral de la boiterie. Ainsi, les résultats accélérométriques vont révéler une asymétrie du côté ipsilatéral pour le signal tête et une asymétrie controlatérale pour le signal garrot. A l'inverse pour une boiterie antérieure les signaux tête et garrot vont être concordant.

## **D. Applications de la mesure quantitative de la boiterie en complément de l'examen orthopédique traditionnel**

### **1. Utilisation sur le terrain des méthodes de mesures quantitatives**

Les mesures quantitatives vont permettre d'apporter un complément d'information à l'observateur et vont donc présenter un intérêt dans le diagnostic et la prise en charge d'une boiterie. L'étude accélérométrique semble être une méthode adaptée dans le cadre de l'examen locomoteur car elle enregistre dans l'espace et dans le temps le déplacement du cheval. Un critère important dans le choix du système est la facilité d'utilisation avec une simplicité et rapidité de mise en place. Le système Movin'Smart entre dans ces critères, et c'est ce dernier qui sera développé dans la partie expérimental de notre manuscrit.

Ce système permet de relier une asymétrie de la locomotion au grade de boiterie établi cliniquement par le vétérinaire. Bien que l'exploitation des données pour une utilisation vétérinaire ne soit pas encore en temps réel, c'est un outil qui peut apporter une évaluation objective de la boiterie : ce qui, dans la pratique, permettra de mettre en place un suivi plus précis du cheval boiteux.

### **2. Evaluation objective des résultats des anesthésies diagnostiques**

Les anesthésies diagnostiques, comprennent les anesthésies régionales : anesthésies nerveuses tronculaires et les anesthésies plus focales : anesthésies synoviales et tendineuses. Elles sont un moyen simple de localisation et permettent ainsi d'objectiver les boiteries. Cependant, l'interprétation des réponses du cheval est très variable. Plusieurs paramètres entrent en compte, la technique de réalisation doit être codifiée, l'évaluation du résultat d'une anesthésie doit être réalisée dans les mêmes conditions que l'évaluation initiale et il faut examiner le cheval dans les conditions qui fournissaient les anomalies locomotrices les plus caractéristiques.

D'autre part, l'action de l'anesthésique n'étant pas quantifiable, une anesthésie partielle de la zone est possible et pourrait fausser le diagnostic. L'interprétation des résultats est, de plus, souvent délicate de par les faibles variations à observer.

Il serait intéressant d'intégrer à l'examen visuel une évaluation objective de la locomotion du cheval, avant et après anesthésie, afin de déterminer de plus faibles variations et ainsi affiner le diagnostic.

### **3. Evaluation objective de l'évolution d'une pathologie et de l'efficacité d'un traitement**

Lors de troubles locomoteurs, le suivi clinique du cheval est indispensable pour apprécier l'efficacité du traitement mis en place. En fonction de la pathologie en cause, il sera examiné sur une période allant de quelques semaines à plusieurs mois et le traitement sera adapté en fonction de l'évolution que présente le cheval.

L'évolution d'une boiterie est parfois subtile et difficilement observable ; de plus, lorsque le cheval est examiné à plusieurs mois d'intervalle et parfois par un praticien différent, la comparaison est difficile. La possibilité de se référer à des données chiffrées obtenues lors du premier examen se révèle particulièrement prometteuse dans ces cas-là et pourrait permettre un suivi plus précis de l'évolution de la boiterie sur le long terme.

### **4. Visites d'achats et expertises judiciaires**

Dans le milieu équin, l'enjeu financier est important et le mécontentement d'un propriétaire peut être l'origine de litiges pouvant aller jusqu'aux procédures judiciaires. Les visites d'achats sont les causes principales de plaintes à l'encontre des vétérinaires. Elles sont à réaliser avec la plus grande attention et la plus grande rigueur en associant examen médical, examen locomoteur et imagerie diagnostique plus ou moins étendue et variée en

fonction des moyens de l'acheteur. Dans ce cadre, l'utilisation d'une analyse objective de la locomotion pourrait se révéler être un atout en cas de litiges.

## **5. Expertise en courses d'endurance**

Depuis plusieurs années, des études sont réalisées afin de faire évoluer les méthodes d'évaluation des défauts d'allures lors de courses d'endurance et les capteurs inertiels sont de plus en plus sollicités.

En effet, sur des boiteries évidentes, les doutes sont peu présents mais lorsqu'il s'agit d'asymétries légères, les discordances d'avis entre les évaluateurs posent problème, d'autant plus que l'évaluation se résume à un examen restreint à une courte distance sans examens complémentaires à disposition.

En 2018, Lopes a investigué la faisabilité de la détection et la quantification d'une allure irrégulière à l'aide de capteurs inertiels de locomotion lors de courses d'endurance [17]. Il a montré que la discordance entre les résultats obtenus avec les capteurs et l'avis des vétérinaires était importante mais qu'une fois la sensibilité des capteurs diminuée, en assimilant les asymétries détectées de faibles grades comme des chevaux non asymétriques, la discordance était nettement diminuée.

Ces résultats mettent en évidence les limitations humaines face à la détection de boiterie de faibles grades. Ceci est dû à la résolution spatiale et temporelle insuffisante de la vision humaine ainsi qu'à la présence de biais entre les évaluateurs. La détection d'allure anormale basée uniquement sur la méthode subjective peut également être influencée par la vitesse des chevaux, un port de queue trop haut rendant plus difficile la visualisation des mouvements du bassin ou les illusions d'optiques créées par des asymétries de bassins ou les variations de la robe. L'expérience de l'évaluateur est également une source de biais comme il a pu être montré dans des études précédentes, de plus, lors de course d'endurance l'examen locomoteur est restreint et seule une brève palpation et inspection sont permises rendant l'évaluation d'autant plus évaluateur dépendant. Il est cependant important de considérer la limite entre une légère asymétrie détectable par les capteurs et une véritable

boiterie de faible grade témoin de l'état de bien-être du cheval. C'est une limite difficile à objectiver et seul l'évaluateur est en capacité de trancher en cas de doutes.

Plusieurs possibilités d'utilisation des capteurs de locomotions sont envisageables sur les courses d'endurance :

- Le système pourrait être utilisé uniquement en cas de contentieux entre les vétérinaires et le cavalier par rapport à l'élimination d'un cheval pour critère locomoteur, bien que ce soit le président du jury qui prenne la décision d'élimination.
- Il pourrait être utilisé sur l'ensemble des évaluations en simple support pour le vétérinaire et le cheval ne pourrait être considéré comme boiteux que dans le cas où il y a concordance entre l'avis vétérinaire et le résultat de l'enregistrement.
- Il pourrait être utilisé comme outil permettant de suivre l'évolution d'une asymétrie d'allure au cours de la course et servir de critère d'élimination en cas d'aggravation de l'asymétrie sur un même membre.
- Il pourrait servir de critère d'élimination en cas de détection d'une allure asymétrique au-dessus d'un seuil préétabli, indépendamment de la visualisation de l'anomalie par le vétérinaire.

L'étude quantitative des boiteries semble avoir sa place dans l'analyse des boiteries. Elle est applicable dans différents domaines, pouvant présenter un avantage dans l'analyse diagnostique comme dans le cadre des expertises judiciaires. Le caractère objectif de cette approche est l'un des plus grands atouts de ce système. De nombreuses recherches ont été effectuées sur le sujet et ont permis d'obtenir des systèmes simples d'utilisation permettant un usage pratique sur le terrain offrant au praticien un outil supplémentaire pour l'évaluation de l'appareil locomoteur du cheval.

## **E. Le système Movin' Smart**

### **1. Les objectifs du système**

Les cavaliers sont de plus en plus en demande d'appareils performants leur offrant un suivi en temps réel de la dynamique de leurs chevaux : l'intérêt étant de se baser sur des données chiffrées et objectives dans le but d'améliorer la performance des chevaux.

En fonction de la discipline, l'outil doit répondre à des critères différents. Sur des épreuves longues et intenses telles que les épreuves d'endurance, le suivi en temps réel présente un avantage pour le cavalier qui pourrait ainsi avoir un aperçu objectif de sa monture. C'est dans cette optique que la société Movin'Smart a mis en place un système de capteurs embarqués relié à une application mobile traitant les données instantanément. Ce système a été créé pour les cavaliers d'endurance, l'objectif étant d'optimiser les efforts et améliorer les performances du cheval tout en préservant sa santé physique.

### **2. Le matériel**

#### **a) Les capteurs**

Le système fonctionne avec une association de deux capteurs inertiels, l'un est fixé sur la têtière entre les oreilles du cheval, l'autre est fixé sur le casque du cavalier. Les capteurs sont protégés par une coque protectrice en caoutchouc permettant leur utilisation quelle que soit les conditions météorologiques. Une pince adhésive se place sous le capteur et permet la fixation du capteur.

Chaque capteur se compose de 3 accéléromètres, gyroscopes et magnétomètres enregistrant les mouvements verticaux, latéraux et horizontaux du cheval et du cavalier. Les capteurs vont ainsi permettre l'acquisition des accélérations, respectivement, dorso-ventrales, médio-latérales et cranio-caudales. L'exploitation de ces données permet, d'une part, l'analyse de la performance du couple cavalier-cheval (allures, techniques de monte,

couplage...) et, d'autre part, l'évaluation du cheval (symétrie des foulées, régularité d'appui...) et donc d'objectiver une potentielle asymétrie.

Les capteurs communiquent en Bluetooth avec une application mobile dédiée qui traite et renvoie les descripteurs utiles à l'utilisateur. Les données des séances sont également transférées vers un serveur, l'utilisateur peut y avoir accès sur son espace personnel.

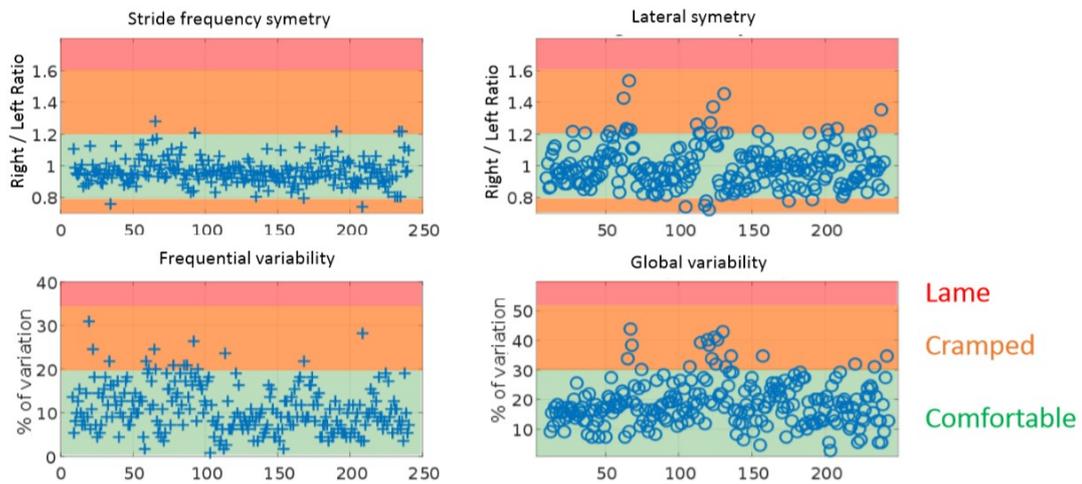
## **b) L'application et le logiciel**

Dans son utilisation « client », associé aux capteurs, un Smartphone muni de l'application Movin'Smart est nécessaire pour l'enregistrement instantané, le traitement et le stockage des données émises par les capteurs. L'application donne, en temps réel, des informations sur la fréquence cardiaque du cheval, la vitesse instantanée, la vitesse moyenne, la distance parcourue mais également sur la proportion des allures adoptées pendant la course, le couplage et la régularité du couplage cheval-cavalier. L'application possède également une fonction « trotting » permettant au cavalier de suivre la qualité de l'allure de son cheval durant ses phases de trotting.

A des fins de recherche, la société Movin'Smart a également développé un logiciel utilisable sur ordinateur permettant le traitement des données issues de trottings. Ce logiciel n'est pas en accès libre pour les clients, mais utilisé en interne. Les données sont donc préalablement enregistrées par l'application mobile, lors de trottings. La transmission des données passe par Bluetooth, une proximité capteur/téléphone est donc indispensable. Puis, les données sont transférées au serveur via une connexion internet. Enfin, ces données peuvent alors être téléchargées avec un ordinateur, et utilisées dans le logiciel.

Pour l'élaboration du logiciel et l'établissement de seuils permettant de distinguer un cheval à allure symétrique d'un cheval à allure asymétrique, 250 relevés ont été analysés. Les 250 relevés ont été réalisés sur un total de 72 chevaux, tous ayant été évalués par un vétérinaire et considérés sains. Les paramètres étudiés sont la symétrie de la fréquence de foulée, la variabilité de la fréquence de foulée, la symétrie du déplacement latéral et la variabilité globale du déplacement. En analysant ces 4 paramètres, un code couleur a été établi

permettant de caractériser l'allure du cheval étudié : vert, orange, rouge respectivement associé à un cheval sain, douteux ou boiteux (Fig. 7).



**Figure 7 : Etablissement d'une échelle de boiterie à 3 grades à partir de l'analyse de 250 enregistrements.**

Pour chacun des paramètres, la moyenne des valeurs obtenues a été calculée. Et c'est en se basant sur le calcul de l'écart interquartile que la zone verte, dite d'un cheval sain, a été établie. Ainsi sur les 250 enregistrements, 75% d'entre eux entrent dans la zone verte, les 25% autres correspondent à la zone orange, dite de cheval douteux. Pour l'établissement de la zone rouge, ce sont des chevaux éliminés de courses d'endurance qui ont été enregistrés car diagnostiqués comme boiteux.

L'établissement de cette échelle de couleur a été repris plusieurs fois et tend à être modifié avec l'objectif d'établir des seuils de plus en plus sensibles jusqu'à atteindre une classification proche de celle de la gradation établie par les vétérinaires de l'American Association of Equine Practitioners. Par la suite les paramètres de symétrie et de variabilité des fréquences n'ont pas été investigués car moins pertinents dans le cadre de l'étude.

Le fonctionnement technique du logiciel sera expliqué avec plus de précision dans la partie expérimentale.

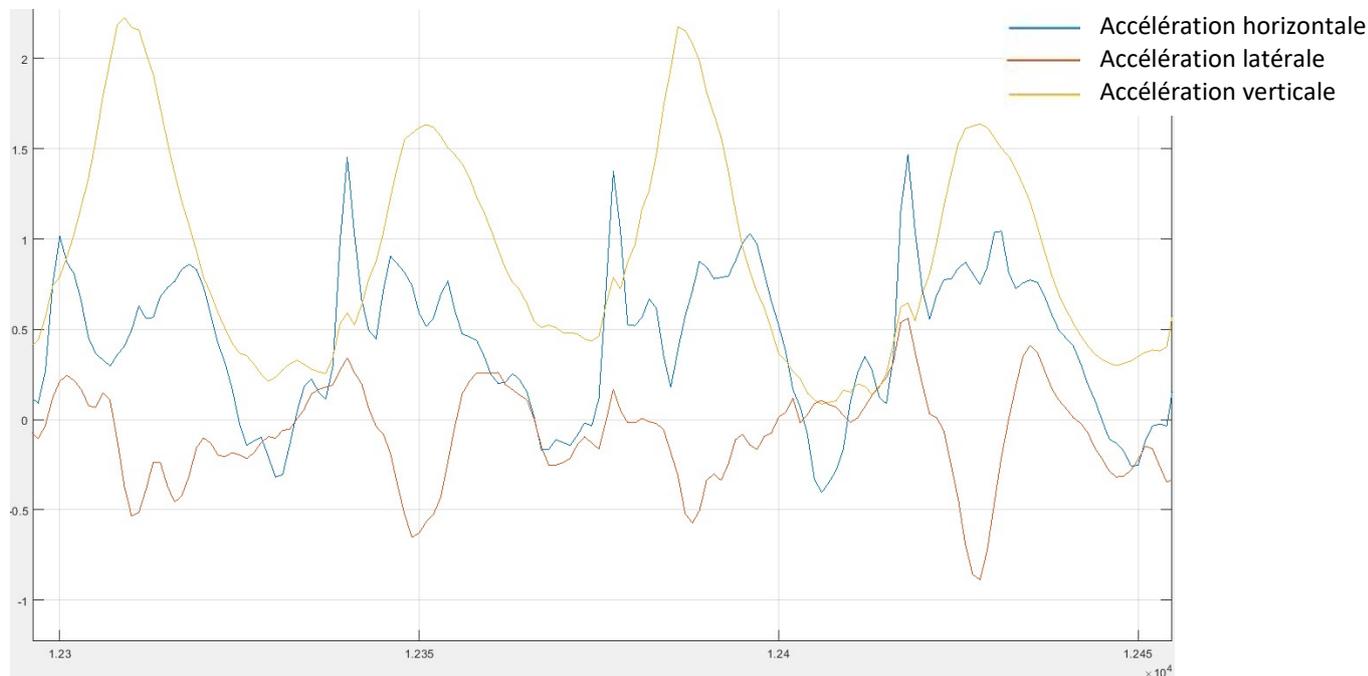
### 3. Les paramètres étudiés et interprétations

Les capteurs accélérométriques enregistrent en trois dimensions et permettent ainsi d'avoir accès à trois signaux aux caractéristiques différentes (Fig. 8). Par conséquent, il n'est pas possible d'exploiter les signaux des 3 composantes de la même manière.

La composante dorso-ventrale (verticale) est la plus utile, elle n'est associée qu'à un faible nombre de bruits et donne, au trot, un signal sinusoïdal ce qui permet une exploitation plus simplifiée de ces données.

La composante latéro-médiale (latérale) est associée à un grand nombre de bruits parasites ce qui complique l'analyse des données mais son exploitation peut tout de même permettre l'identification du diagonal étudié.

La composante cranio-caudale (horizontale) ne donne pas un signal oscillatoire, il est donc plus difficile à analyser.



**Figure 8 :** Signaux accélérométriques horizontaux, latéraux et verticaux enregistrés par le capteur tête sur deux foulées.

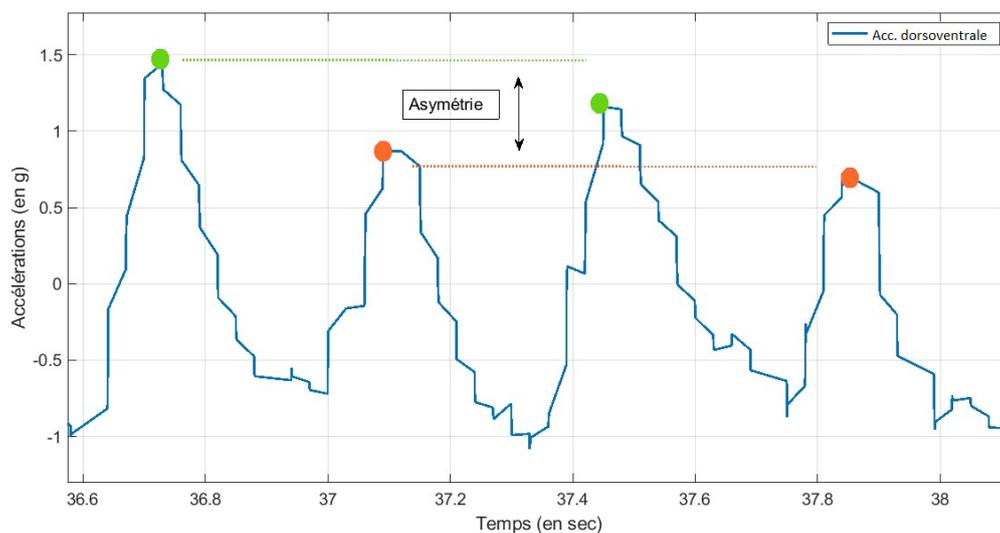
Comme il a déjà été précisé en amont, les paramètres étudiés sont la symétrie et la variabilité de l'allure. Une foulée, constituée du posé successif des deux diagonaux, est caractérisée par la succession de deux mouvements de tête haut/bas.

Nous avons vu que lorsqu'un cheval boite, il va tenter de soulager le membre douloureux en exagérant son mouvement de tête ascendant lors du poser de ce membre, limitant ainsi la force appliquée sur ce membre.

En se basant sur le signal dorso-ventral de la tête et en faisant le rapport des hauteurs maximales on peut en conclure à une asymétrie de l'allure (Fig. 9). Sur un enregistrement complet, la valeur de la symétrie latérale est obtenue par le calcul de ces rapports sur l'ensemble des foulées de l'enregistrement.

D'une façon simplifiée on peut considérer que la symétrie latérale compare les forces d'appui de chaque diagonal.

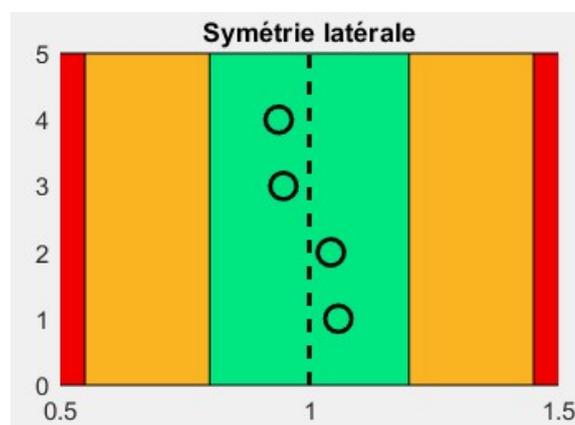
La variabilité de l'allure sera, quant à elle, déduite du calcul de la variabilité sur tous les maxima des pics d'accélération d'une séquence de trotting.



**Figure 9 :** Mesure du rapport entre les hauteurs maximales révélant une asymétrie sur le signal accélérométrique vertical enregistré par le capteur tête.

Sur le logiciel, pour que l'interprétation soit plus visuelle, les résultats de l'analyse de la symétrie latérale sont présentés sous forme graphique avec des valeurs centrées sur la valeur 1 (Fig. 10). Un marqueur représente la valeur moyenne de symétrie latérale sur une longueur, ainsi sur deux allers-retours on obtient quatre valeurs.

Lorsque la valeur est comprise entre 0,8 et 1,20, le cheval est considéré comme non boiteux, hors cet intervalle le cheval est douteux. Lorsque les valeurs sont inférieures à 0,5 et supérieures à 1,5, le cheval est considéré boiteux avec une boiterie de grade supérieur à 3/5. Le graphe en vertical permet une visualisation du côté de l'asymétrie. Pour le capteur tête, il a été établi que lorsque les valeurs de symétrie latérale sont inférieures à 1 donc à gauche sur la représentation, c'est le diagonal gauche qui est soulagé et inversement quand les valeurs sont à droite. Pour le capteur garrot l'interprétation est inversée les valeurs inférieures à 1 indique une boiterie du diagonal droit.



**Figure 10 :** Symétrie latérale sur deux allers-retours au trot.

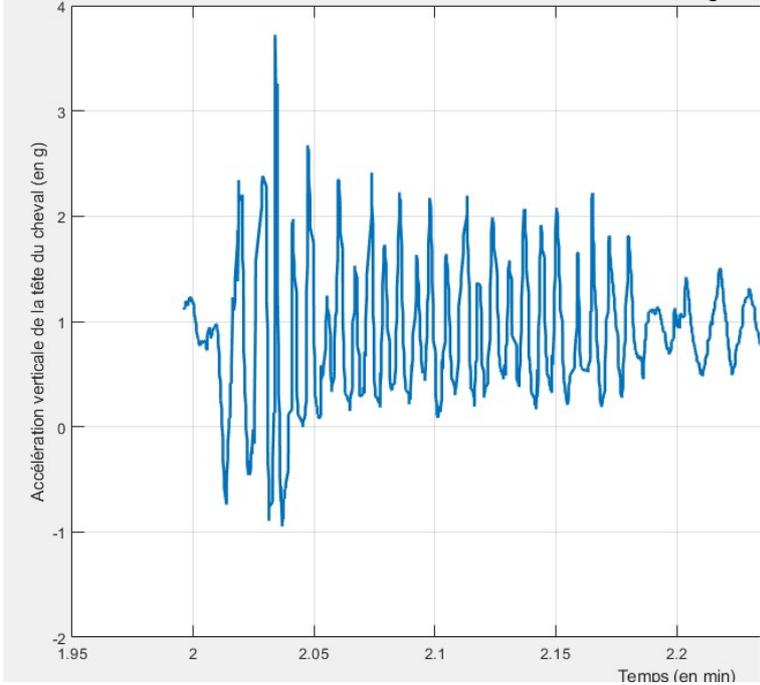
La variabilité latérale illustre une irrégularité globale de l'allure, elle prend en compte la différence de d'accélération et de forces sur le posé des différents diagonaux. On a pu remarquer que cet indice a tendance à varier avant que l'indice de symétrie latérale n'indique de boiterie.

La variabilité latérale va être modifiée par la modification de l'allure du cheval boiteux mais va également varier lors d'une mauvaise réception des données ou par des mouvements parasites (mouvements de tête, écarts, excitation...).

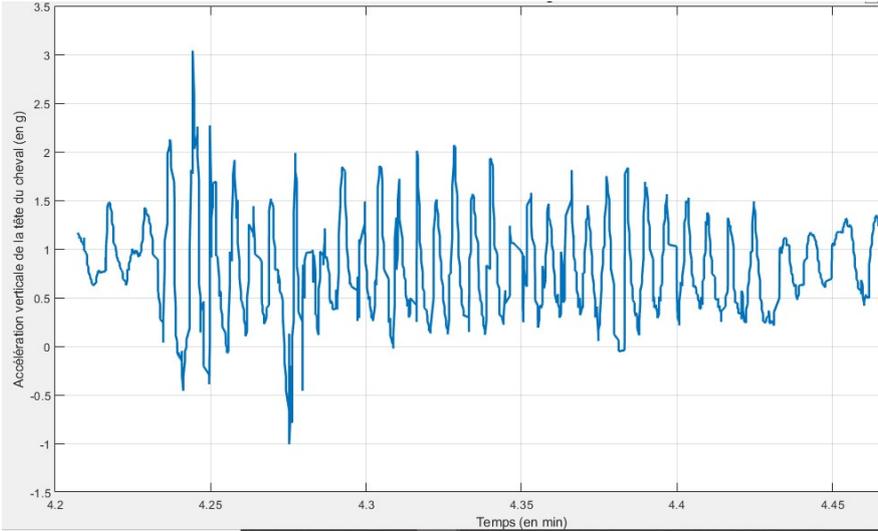
Afin de distinguer ces différents cas de figure, il est important de se reporter aux autres paramètres calculés par le logiciel ainsi qu'au tracé du signal.

L'indice de qualité de réception permet de vérifier le premier biais, la symétrie latérale et le graphe vont permettre de distinguer un état de boiterie des mouvements parasites. En effet, lors d'une boiterie l'irrégularité du signal sera globalement régulière (Fig. 11), tant dis que si

la variabilité est affectée par les mouvements de tête le graphe va révéler un faible nombre de pics qui ressortent par rapport aux autres de façon irrégulière (Fig. 12).



**Figure 11 :** Signal accélérométrique vertical mettant en évidence une boiterie, associé à une variabilité latérale de 40%.



**Figure 12 :** Signal accélérométrique vertical, associé à une variabilité latérale de 63% et une symétrie latéral ne mettant pas en évidence de boiterie.

Sur ces deux graphes illustrant deux cas de figures on différencie une irrégularité régulière d'une irrégularité irrégulière. L'une révélant une boiterie, l'autre révélant des mouvements parasites possiblement liés à une excitation du cheval.

Ainsi, dans cette première partie nous avons détaillé l'examen locomoteur effectué par le vétérinaire praticien associé aux examens complémentaires indispensables à l'identification de l'anomalie. Nous avons également vu la pertinence de l'utilisation de méthodes objectives dans le diagnostic de boiterie. Deux principales méthodes, cinématique et cinétique, se développent et plusieurs utilisations de ces méthodes pourraient être envisagées. Au vu des différentes études, il apparaît, cependant, que la méthode accélérométrique est la plus adaptée pour une utilisation du praticien sur le terrain. Le trot est l'allure qui va permettre d'obtenir des informations dont l'interprétation se prête au mieux à l'étude de la locomotion du cheval. Le système Movin'Smart va servir de base pour le travail expérimental qui va suivre. Grâce à la collaboration du Dr Bruno BAUP, l'objectif recherché est d'augmenter la sensibilité du système afin de le rendre plus performant.

Dans une seconde partie, seront présentés le contexte de l'étude ainsi que le matériel et la méthode choisis pour la phase expérimentale. Les résultats et la discussion autour de cette étude seront exposés en suivant.



## DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

ADAPTATION D'UN SYSTEME ACCELEROMETRIQUE D'EVALUATION  
DU CHEVAL D'ENDURANCE A UNE UTILISATION VETERINAIRE SUR LE  
TERRAIN

# **I. Introduction**

## **1. Contexte expérimental**

Dans la première partie, nous avons abordé les différentes approches objectives de l'examen locomoteur du cheval. Nous avons, en particulier, montré les intérêts de l'analyse accélérométrique ; les atouts principaux étant la réduction des coûts grâce à un matériel peu onéreux et un faible taux de stockage, ainsi qu'une réduction importante du temps de traitement des données obtenues associée à une facilité de mise en place rendant son utilisation possible sur le terrain.

Dans le milieu vétérinaire, l'utilisation de cette approche pourrait être un atout dans le diagnostic de boiterie de grade inférieur à 3/5. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les capteurs accélérométriques sont capables d'enregistrer des modifications très fines de l'allure ; ce dont l'œil humain est incapable. Le système pourrait apporter un support objectif pour un suivi de la boiterie, mais également une mesure quantitative de l'efficacité et de l'impact d'un traitement ou d'une correction de maréchalerie effectuée.

## **2. Objectifs de l'étude**

En se basant sur le système Movin'Smart et en l'adaptant à nos contraintes, les objectifs de l'étude ont été une optimisation du système pour une utilisation lors d'un examen locomoteur par le vétérinaire, un affinage de la sensibilité de détection des asymétries d'allures et donc un perfectionnement du système pour une utilisation sur le terrain par le vétérinaire.

L'application étant initialement orientée vers les cavaliers de courses d'endurance, l'objectif était de l'ajuster pour un usage vétérinaire. Pour ce faire notre étude s'est basée

sur les enregistrements accélérométriques de la locomotion de différents chevaux, examinés en parallèle par un vétérinaire, afin d'obtenir une corrélation entre le diagnostic du praticien et les données accélérométriques obtenues. Bien évidemment, l'objectif du système n'est en aucun cas de remplacer l'avis des professionnels mais bien d'apporter un complément, une aide, au diagnostic lors de cas sensibles.

Dans cette optique, des échantillons de chevaux ont été sélectionnés afin d'obtenir des données associées à des boiteries antérieures et postérieures. La confrontation des enregistrements en fonction du type de boiterie va permettre de rechercher des modifications, visibles sur le signal accélérométrique, caractéristiques et spécifiques à chaque membre, et donc, à terme, d'affiner la sensibilité des capteurs. L'intérêt est de réussir à distinguer des boiteries antérieures et postérieures en particulier dans le cas de compensation croisée et de pouvoir leur associer un grade AAEP.

Cette étude vise également à permettre de répondre à plusieurs interrogations sur l'intérêt de l'utilisation de plusieurs capteurs, sur la pertinence de leurs emplacements et sur l'information qu'ils peuvent apporter sur les boiteries antérieures et postérieures.

### **3. Contraintes à respecter**

Le système doit répondre à des contraintes particulières en termes d'utilisation et de résultats :

- Contraintes liées à l'utilisation :
  - Le système doit être simple et rapide à mettre en place ;
  - Le système doit pouvoir s'adapter aux différentes morphologies des chevaux examinés ;
  - Le système ne doit pas modifier la locomotion du cheval ;
  - Le protocole d'utilisation doit être standardisé pour être identique pour l'ensemble des chevaux.

- Contraintes liées aux résultats :
  - Toute valeur aberrante de l'un des paramètres d'étude entraîne une baisse de la fiabilité du résultat ;
  - Les résultats obtenus sur le logiciel doivent être clairs ;
  - L'indice de symétrie associé à l'indice de variabilité doit être un indicateur d'un certain degré de boiterie et doit permettre l'identification du membre boiteux ;
  - Les capteurs inertiels doivent être suffisamment sensibles afin que même les faibles modifications soient reflétées par des altérations de l'indicateur de symétrie.

## II. Matériels et méthode

### 1. Les chevaux utilisés

L'étude est basée sur l'enregistrement de chevaux considérés sains et de chevaux considérés boiteux après avis d'un vétérinaire. L'échantillon de chevaux sélectionnés pour l'étude est constitué d'une part, de chevaux provenant de la clientèle du Docteur Bruno BAUP, venus en consultation à la Clinique du Cheval pour un examen locomoteur au cours d'une première période de 1 mois puis d'une période de 2 semaines (57/72) et d'autre part de chevaux de propriétaires volontaires pour l'étude (15/72). Les chevaux ont été recrutés avec pour seul critère une taille supérieure à 1m40. Un total de 73 enregistrements a été réalisé. Tous les chevaux utilisés sont des chevaux habitués à la manipulation par l'homme et débouffés hormis trois jeunes chevaux de 2 ans destinés à l'endurance. Aucune réaction en rapport avec la mise en place du dispositif, pouvant altérer les résultats de l'étude, n'a été relevée.

Les chevaux avaient entre 2 et 24 ans avec une moyenne d'âge de  $11 \pm 3$  ans. La majorité des chevaux examinés par le Dr Baup étaient des chevaux de sport (CSO, CCE et endurance), mais des chevaux de loisir et de centre équestre ont également été examinés ; par contre, aucun cheval de course hippique n'a été inclus dans notre échantillon.

Les motifs de consultations étaient variés, entre le diagnostic d'une boiterie récemment observée, le suivi d'une boiterie déjà diagnostiquée ou en guérison ainsi que des visites d'achat. Aucun critère de race n'a été appliqué. Seuls les poneys de petite taille (inférieure à 1m40) ont été écartés de l'étude pour une question de réglage de la sangle qui ne s'adaptait pas bien aux petits gabarits.

Les enregistrements ont été réalisés simultanément à l'examen locomoteur de chaque cheval mais les analyses accélérométriques ont été réalisées à posteriori. Le vétérinaire n'ayant pas accès aux résultats au moment de l'examen du cheval, il n'a donc pas été influencé dans sa détermination du membre boiteux et sa gradation de boiterie.

Tous les enregistrements ont été inscrits dans un registre précisant le nom du cheval, l'heure et la date de l'enregistrement, son âge, les observations du vétérinaire lors de l'examen locomoteur et le diagnostic final.

## 2. Le dispositif accélérométrique

Le dispositif accélérométrique utilisé pour l'étude est celui du système Movin'Smart, composé de deux capteurs fixés directement sur le cheval. Ce sont des centrales inertielles de la marque Mbient Lab dont la fréquence d'enregistrement est de 100Hz par capteur. La sensibilité minimale nécessaire pour l'enregistrement des accélérations d'un cheval au galop est d'environ 10g. L'objectif final étant d'exploiter les données obtenues aux trois allures, des capteurs ayant une sensibilité de mesure des accélérations de +/- 16g dans les trois dimensions ont été choisis.

Un des objectifs de l'étude étant de déterminer la fiabilité de l'étude des mouvements du garrot en comparaison à ceux de la tête, le premier capteur a été fixé au niveau de la tête centré entre les deux oreilles, tout comme pour l'utilisation initiale du système, tandis le second a été placé au niveau du garrot (Fig. 13 et 14). Le positionnement du capteur cavalier sur le garrot a pour objectif de connaître sa pertinence dans la détection de boiterie et en particulier des boiteries postérieures. Des études ont montré la pertinence de capteurs positionnés sur les tuber coxae [38], mais notre étude cherchait à montrer que le capteur garrot pourrait être suffisant.



**Figure 14 :** Capteur tête mis en place, couvert par une protection.



**Figure 13 :** Capteur garrot mis en place, sans protection.

Un paramètre important à respecter étant la simplicité et la rapidité de mise en place du dispositif en plus de la réduction de l'aléa distance capteur/téléphone, une sangle permettant la fixation du second capteur au niveau du garrot ainsi que l'embarquement du téléphone grâce à une petite pochette cousue sur le côté de la sangle a été confectionnée. Cette sangle, extrêmement légère, est réglable ce qui permet une adaptation aux différentes morphologies et limite les interférences sur la locomotion du cheval qui serait liées à un inconfort induit par la sangle (Fig. 15).



**Figure 15 :** Dispositif accélérométrique mis en place. Composé par les capteurs (flèches rouge) et la sangle permettant l'embarquement du téléphone (flèche bleu).

Ce dispositif permet l'obtention d'enregistrements et de données comparables car obtenus de façon similaire pour tous les chevaux testés.

### **3. Les adaptations du logiciel et de l'interface**

Le logiciel a été développé par la société Movin'Smart à des fins de recherches, sous Matlab sous forme d'un algorithme temps réel. Il permet une analyse des trottings enregistrés. Cet algorithme comprend plusieurs tâches comme la détermination des zones « réelles » de trotting ou le calcul des descripteurs de la qualité du trotting. Ces descripteurs

sont les paramètres d'évaluations établis en amont sur lesquels se base l'étude afin d'évaluer la qualité du trotting étudié.

Il y a d'une part la symétrie qui compare les forces d'appui des deux diagonaux et, d'autre part, la variabilité qui va évaluer la régularité globale de l'allure sur une séquence de trot. Une dégradation de l'indice de symétrie indique une irrégularité avérée sur toute la longueur du trot, tandis qu'une altération de la variabilité indique un trotting irrégulier mais pas forcément sur toute la longueur du trot.

Une fois le trotting réalisé et les données chargées, l'algorithme corrige les données obtenues en fonction de la position physique réelle du capteur : une procédure de calibration des accélérations s'opère sur l'ensemble du signal. En se basant sur le signal accélérométrique dorso-ventral, l'algorithme va pouvoir identifier les zones de trotting et distinguer les foulées, tandis qu'avec le signal médio-latéral il détermine le diagonal posé. Sur la dernière version du logiciel, il est demandé à l'utilisateur de sélectionner la zone de trotting manuellement ce qui permet un ciblage plus rapide de l'algorithme sur la zone recherchée, surtout quand le protocole d'expérimentation comprend plusieurs éléments (pas, trotting, mise en longe au trot et au galop...).

Une seconde interface Matlab a ensuite été créée permettant une interaction plus simple entre les données et le logiciel. Sur cette interface, l'utilisateur a accès au signal accélérométrique de l'ensemble de l'enregistrement, au signal des zones de trottings sélectionnées centré sur 0 après la soustraction de la composante de gravité par le logiciel, et aux paramètres de qualité du trotting, sous forme graphique pour la symétrie latérale des foulées et sous forme de code couleur associé à leur indice pour la variabilité latérale ainsi que la qualité de réception des données. Cette interface est également capable de visualiser une potentielle erreur (mauvais nom de fichier, erreur dans la sélection de la zone de trotting...), de l'identifier et d'afficher un message en conséquence, permettant ainsi à l'utilisateur de la rectifier.

Le calcul de l'indice de qualité de réception des données, durant la phase d'enregistrement, apporte une information sur la fiabilité de la mesure. Il correspond au pourcentage de données reçues par rapport au nombre de données attendues. L'indice de qualité a été calculé pour chaque seconde, et sur la totalité du trotting nous cherchons à ce que 75% des

indices soit supérieurs à 90% de réception des données. Il a été considéré que si l'indice était inférieur à 95%, l'interprétation des résultats devaient être mise sous réserve. Il est possible d'avoir un indice supérieur à 100 lorsque le nombre de données reçues est supérieur au nombre attendu, cela n'a pas de conséquence sur les résultats mais en améliore la fiabilité.

Cette dernière version de l'interface a été créée dans le but d'optimiser et faciliter son utilisation avec une succession d'étapes à suivre permettant l'obtention des différentes données analysées. En premier lieu, après s'être assuré que le fichier à analyser est bien placé dans le dossier associé au logiciel, il faut entrer le nom exact du fichier et demander l'affichage du signal complet. L'étape suivante est la sélection manuelle de la zone d'étude, le logiciel affiche la zone sélectionnée et demande confirmation du choix. Après validation, la portion du signal sélectionnée s'affiche sur l'interface et il est alors possible de lancer l'analyse et d'obtenir les résultats de cette analyse. Cette interface donne la possibilité d'analyser les données obtenues à partir du capteur de tête mais également celles obtenues à partir du capteur garrot. C'est une option qui permet d'extraire d'un même fichier les deux informations contenues dans l'enregistrement et donc de pouvoir les exploiter. Une fonction de sauvegarde en fichier au format .csv a été ajoutée pour notre étude afin de stocker les résultats de chacun des enregistrements analysés dans un dossier en parallèle. Pour chaque fichier analysé, les données sauvegardées sont les indices de symétrie, de variabilité et de qualité de réception des données ainsi que l'ensemble des informations permettant d'identifier le fichier tel que le nom du fichier, la date et l'heure d'acquisition.

#### **4. Protocole d'enregistrement**

L'objectif étant d'obtenir une variabilité interindividuelle minimale, une standardisation des enregistrements a été établie au préalable. L'ensemble des enregistrements ont été réalisés sur des chevaux en main menés par leur propriétaire et chaque enregistrement comprenait la totalité de l'examen dynamique.

Deux protocoles d'enregistrement ont été utilisés. Pour l'échantillon de chevaux évalués par l'investigateur de l'étude, faute de structure adaptée, le protocole utilisé a été le suivant : un aller-retour au pas en ligne droite suivi d'un 8 de chiffre sur sol dur, un aller-retour en ligne

droite au trot sur sol dur et puis sur sol mou. Pour l'échantillon suivi par le Dr Bruno BAUP, le protocole appliqué a été celui d'un examen locomoteur dynamique complet : un aller-retour au pas en ligne droite suivi d'un 8 de chiffre sur sol dur, un ou deux allers-retours au trot sur sol dur, mise en cercle au trot puis au galop aux deux mains sur sol intermédiaire, mise en cercle au trot puis au galop aux deux mains sur sol mou. Les enregistrements de cette deuxième population de chevaux sont issus de plusieurs sessions, majoritairement réalisés à la Clinique du Cheval à Grenade ou dans différentes écuries suivies par le Dr Bruno BAUP.

Chaque cheval a été équipé d'une sangle ajustable permettant la fixation du capteur garrot et du téléphone embarqué, et d'un capteur tête fixé sur la têtère du licol, lui-même ajusté correctement afin d'éviter tout balancement du capteur qui pourrait créer des interférences sur le signal.

Pour l'ensemble des chevaux évalués par le Dr BAUP, un examen locomoteur complet a été effectué, comprenant l'examen statique et l'examen dynamique suivi par les tests de flexions actives et passives. Des examens complémentaires ont été réalisés si estimés nécessaires.

Ainsi, pour les 57 chevaux évalués par le Dr BAUP l'enregistrement de l'examen dynamique a été associé à un compte rendu de consultation donnant accès à un diagnostic final.

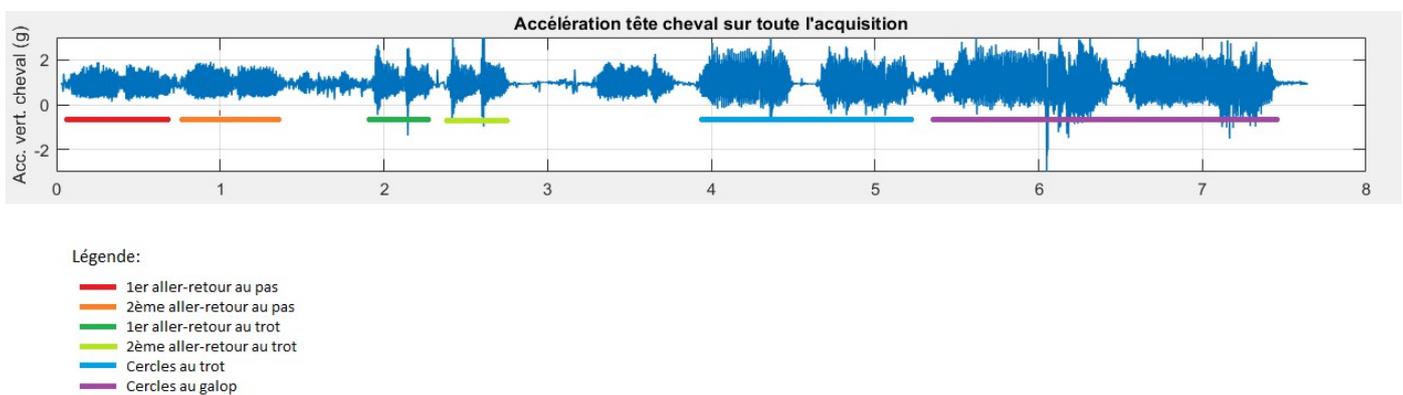
Pour les autres chevaux, seule une évaluation locomotrice dynamique a été menée en parallèle à l'enregistrement des données des capteurs.

## **5. Traitements des données**

Le logiciel Movin' Smart Trotting permettant l'analyse des fichiers ne fonctionne, pour le moment, que sur la partie de trotting. Il a donc fallu sélectionner cette zone sur nos enregistrements.

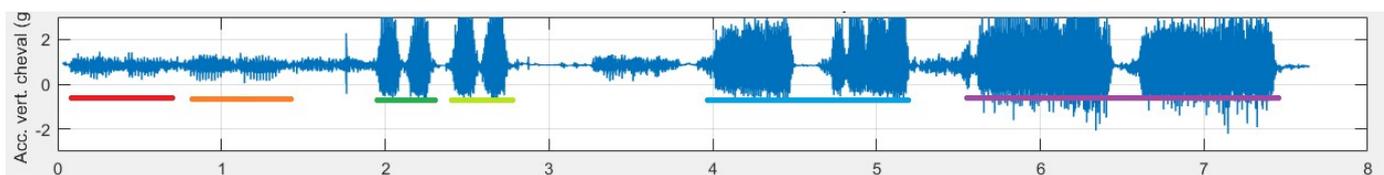
Le signal d'accélérométrie diffère en fonction de l'allure, c'est à l'aide de cette différence visuelle et en analysant à l'œil l'amplitude des accélérations et les fréquences des oscillations, comme expliqué ci-après, que nous avons pu déterminer la zone à sélectionner.

Le fichier initialement transcrit correspond uniquement à la composante verticale de l'accéléromètre, ce qui donne donc une courbe de l'accélération dorso-ventrale en fonction du temps (Fig. 16).



**Figure 16 : Découpage du signal accélération dorso-ventrale sur un enregistrement complet des mouvements de la tête.**

Sur le signal de l'enregistrement des mouvements de la tête, la zone de trot est identifiable par l'allure sinusoïdale de la courbe associée un pic initial correspondant à l'impulsion de départ puis une diminution progressive de l'amplitude. Les zones de pas sont des phases plus constantes avec une accélération initiale moins importante que pour un départ au trot. Nous distinguons les zones où le cheval est en cercle car ce sont des phases plus longues, au trot le signal est toujours sinusoïdal tant dis qu'au galop la courbe est plus irrégulière de par le caractère asymétrique de l'allure. Sur le signal de l'enregistrement des mouvements du garrot, les variations du signal sont moins importantes dû à la mobilité plus réduite du garrot en comparaison à la tête du cheval (Fig. 17).



Légende:

- 1er aller-retour au pas
- 2ème aller-retour au pas
- 1er aller-retour au trot
- 2ème aller-retour au trot
- Cercles au trot
- Cercles au galop

**Figure 17 : Découpage du signal accélération dorso-ventrale sur un enregistrement complet des mouvements du garrot.**

Sur l'enregistrement du garrot, les phases de pas sont plus difficilement distinguables car les amplitudes des accélérations mesurées sont plus faibles. De façon globale, il y a moins de mouvements parasites, les zones de trot ne présentent pas de pics d'impulsion mais plutôt un bloc d'accélération constante, plus importante qu'au pas. Sur le cercle, le signal est similaire à l'enregistrement des mouvements de la tête du cheval.

Une fois la zone de trot en ligne droite identifiée et sélectionnée, le logiciel va harmoniser la courbe et en ressortir un signal en créneau, identifiant la zone trottée. Il va ensuite pouvoir analyser les données de cette zone précise et en ressortir la symétrie latérale et la variabilité globale de l'enregistrement. L'indice de qualité de réception des données lors de l'enregistrement est également calculé afin de s'assurer de la pertinence des données et d'écartier les défauts d'enregistrements.

### **III. Résultats**

Dans un premier temps, nous allons faire une présentation détaillée des différents cas de boiteries rencontrées. Dans un deuxième temps, nous étudierons les données de l'approche accélérométrique de la locomotion des chevaux examinés. Nous ferons ensuite une analyse globale permettant d'étudier la corrélation entre le membre identifié comme boiteux par le vétérinaire et les résultats accélérométriques. Une dernière partie sera concentrée sur l'analyse des résultats accélérométriques confrontés aux grades de boiterie associés.

#### **A. Examen des chevaux par une approche classique**

##### **1. Chevaux examinés par le Dr Bruno BAUP**

Cette partie présente les diagnostics établis par le Dr BAUP, ce qui représente 57 chevaux sur les 72 chevaux totaux de l'étude. Les bilans diagnostiques sont répartis en quatre catégories : les bilans satisfaisants, les boiteries antérieures, les boiteries postérieures et les boiteries associées à une atteinte haute.

##### **a) Bilan locomoteur satisfaisant**

Après un examen locomoteur complet, le bilan a été considéré satisfaisant lorsqu'aucune boiterie n'a été détectée quelle que soit l'allure et que les tests de flexions étaient négatifs ou gradés à moins de 2/3 pour maximum un membre.

Sur l'ensemble des 57 chevaux examinés le Dr Bruno BAUP, vingt-deux ont présenté un bilan locomoteur satisfaisant. Quatorze d'entre eux n'ont présenté aucune anomalie

diagnostiquée, pour les huit autres une pathologie n'ayant pas de répercussion clinique significative sur la locomotion du cheval a été diagnostiquée.

Un cas était un suivi pour arthropathie inter-phalangienne proximale du postérieur gauche, sans anomalie à l'examen locomoteur.

Quatre chevaux présentaient une dorsalgie révélée lors des tests statiques de dorsi-flexions. Les deux premiers présentaient une dorsalgie thoracique tandis que les deux autres présentaient plutôt une sacro-lombalgie.

Deux autres chevaux ont présenté un examen locomoteur satisfaisant mais l'imagerie a révélé une desmite de l'insertion proximale du lobe médial du ligament suspenseur du boulet antérieur droit sur un premier cas et, un syndrome articulaire dégénératif de l'articulation inter-phalangienne distale de l'antérieur droit sur un second cas.

Le dernier cheval présentant une anomalie à la palpation mais sans modification de la locomotion était un cheval présentant un suros sur la face médiale du canon de l'antérieur gauche douloureux à la pression.

## **b) Diagnostic de boiteries antérieures**

### ***(1) Boiteries de l'antérieur droit***

Un total de treize chevaux a été diagnostiqué avec une boiterie de l'antérieur droit. Les origines et les causes de ces boiteries étaient multiples : arthropathie dégénérative du boulet, syndrome podotrochléaire, entorse inter-phalangienne, bleime du pied, plaie de glome...

Ces chevaux ont donc été classés en fonction du grade attribué à leur boiterie par le vétérinaire en suivant la gradation de l'AAEP.

Sur l'ensemble de ces chevaux, six ont présenté une boiterie gradée à 2/5 et six ont présenté une boiterie de grade 1/5, et un associé à un grade inférieur à 1/5. Aucune boiterie de grade supérieur à 2/5 n'a été présentée.

Dans la majorité des cas, un examen d'imagerie a été réalisé pour confirmer la suspicion diagnostique. Les boiteries les plus sévères ont été associées à un syndrome podotrochléaire, à une arthropathie inter-phalangienne proximale et à une bleime. Les boiteries plus légères étaient plutôt associées à des arthropathies dégénératives.

## **(2) Boiteries de l'antérieur gauche**

Onze chevaux ont été diagnostiqués avec une boiterie de l'antérieur gauche. Comme pour les chevaux précédents, les chevaux ont été classés en fonction du grade de boiteries attribué.

Un cheval diagnostiqué avec un syndrome podotrochléaire associé à une atteinte du tendon fléchisseur profond a présenté une boiterie gradée à 4/5.

Quatre chevaux ont présenté une boiterie de grade 3/5, les causes de ces boiteries étant variées : syndrome podotrochléaire, crapaud et entorse inter-phalangienne proximale et/ou distale.

Trois chevaux ont été associés à une boiterie de grade 2/5. Un examen radiographique a permis de mettre en évidence la présence d'un kyste sous-chondral pour l'un d'entre eux et une angulation négative de la phalange distale pour les deux autres chevaux.

Les trois derniers chevaux ont été diagnostiqués avec une boiterie de l'antérieur gauche gradée à 1/5, deux d'entre eux ont été examinés pour suivi de boiterie suite au diagnostic d'une tendinite du fléchisseur superficiel de l'antérieur gauche, les lésions n'étant toujours pas stabilisées le jour de l'examen.

### **c) Diagnostic de boiteries postérieures**

#### **(1) Boiteries du postérieur droit**

Six chevaux ont été diagnostiqués avec une boiterie du postérieur droit, deux présentant un éparvin sévère du jarret droit induisant une boiterie gradée à 2/5. Un troisième cheval a présenté une boiterie estimée à 2/5, une suspicion de fracture du bassin droit a été établie pour ce cheval.

Les trois autres chevaux ont présenté une boiterie gradée à 1/5 mais aucun diagnostic précis n'a pu être établi.

#### **(2) Boiteries du postérieur gauche**

Seulement deux chevaux ont été diagnostiqués avec une boiterie postérieure gauche, toutes deux gradées à 1/5. Le premier présentait un début d'éparvin du jarret gauche, pour le second une suspicion d'œdème osseux sous-chondral du boulet postérieur gauche a été établie, entraînant un défaut de descente du boulet.

### **d) Diagnostic d'une atteinte haute**

Trois chevaux ont été diagnostiqués avec une atteinte haute ayant une répercussion sur la locomotion mais ne permettant pas de latéraliser la boiterie.

Le premier a un antécédent d'accident de la route ayant provoqué des lésions traumatiques des cervicales hautes induisant un port de tête anormal au travail.

Le second présentait une circumduction augmentée bilatérale des postérieurs associée à un défaut de flexion des hanches.

Le dernier cheval a présenté une sévère contracture à la base du garrot causé lors du transport faussant ainsi le bilan locomoteur du cheval.

Ces chevaux ont été écartés de l'étude car ils ne correspondaient pas aux critères définis au préalable.

## **2. Chevaux enregistrés sur le terrain**

Les enregistrements des quinze chevaux examinés par l'investigatrice de cette étude, ont été réalisés sur le lieu de vie des chevaux. Lors de leur enregistrement, trois d'entre eux ont présenté une boiterie, deux de l'antérieur droit et la troisième du postérieur gauche. En l'absence de vétérinaire diplômé, aucun diagnostic lésionnel précis n'a été établi. Cet échantillon a été utilisé afin de tester directement l'application une fois le travail de corrélation terminé. Les résultats obtenus à partir de l'analyse de ces enregistrements ont donc été comparé avec les données des chevaux examinés par le Dr BAUP.

### **B. Présentation des données obtenues par l'analyse accélérométrique**

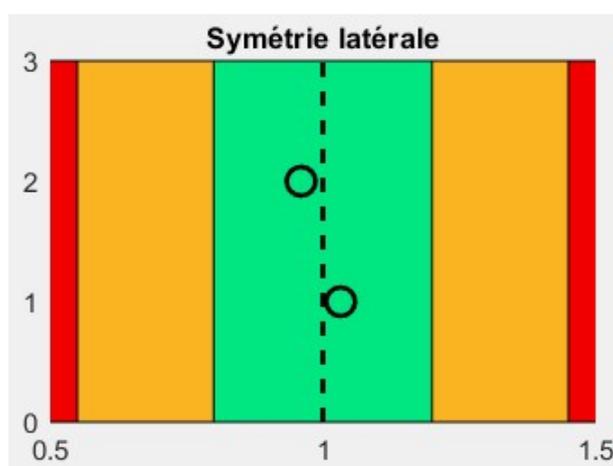
En 2018, Rhodin a émis l'hypothèse que dans le contexte d'une boiterie postérieure les signaux tête et garrot sont inversés. Selon lui, dans ce cas, le signal tête révèle une asymétrie du côté ipsilatéral de la boiterie et le signal garrot une asymétrie du côté controlatéral ; à l'inverse d'une boiterie antérieure pour laquelle les deux capteurs révèlent une boiterie du même côté [37]. C'est en s'appuyant sur ce postulat que l'analyse des données de l'accélérométrie a été évaluée.

## 1. Chevaux examinés par le Docteur Bruno BAUP

Pour les 57 chevaux examinés par le Dr BAUP, 58 enregistrements ont été réalisés. Pour l'un des chevaux, deux enregistrements ont été effectués : avant et après la réalisation d'une anesthésie digitale distale de l'antérieur gauche se révélant positive, passant ainsi d'une boiterie de l'antérieur gauche à une boiterie de l'antérieur droit. Les trois chevaux diagnostiqués avec une atteinte haute étant écartés de l'étude, un total de 55 enregistrements a été analysé. Les résultats ont été divisés en quatre catégories : allure symétrique, asymétrie à droite, asymétrie à gauche et les enregistrements révélant une asymétrie difficilement définissable.

### a) Allures symétriques

L'allure d'un cheval a été considérée symétrique lorsque, sur ses deux enregistrements, signal tête et signal garrot, l'ensemble des marqueurs étaient compris dans la zone verte avec des valeurs proches de 1 et qu'aucune tendance d'asymétrie droite ou gauche n'était visible (Exemple Fig.18).

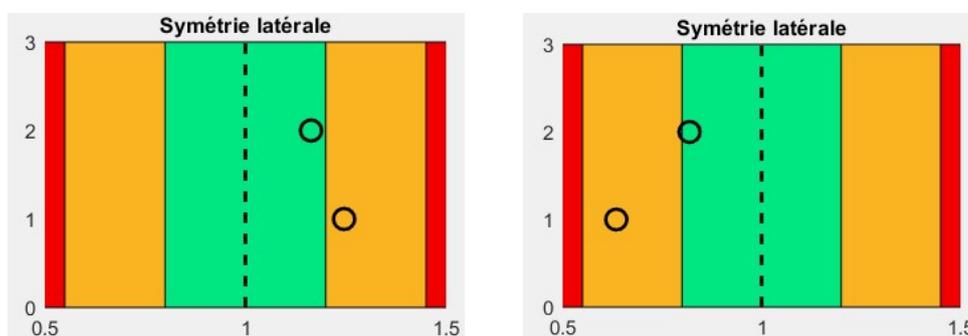


**Figure 18 :** Exemple d'un enregistrement reflétant une allure symétrique.

Seuls dix enregistrements ont correspondu à ces critères. La valeur moyenne des indices de symétries de ces dix enregistrements était de  $1,004 \pm 0,105$ . En créant un intervalle de la moyenne – écart-type et moyenne + écart-type, nous constatons que 68% des indices de symétrie de ces chevaux étaient compris dans cet intervalle de 0,90-1,11. Cet intervalle a donc été choisi, dans notre étude, comme intervalle de référence correspondant aux chevaux sains.

### b) Asymétries à droite

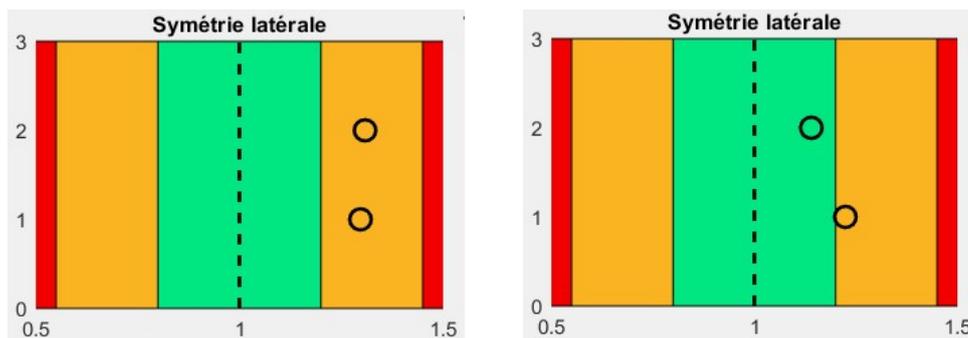
Une allure a été considérée asymétrique à droite lorsque les indices de symétries étaient supérieurs à 1,11 pour le signal de tête et inférieurs à 0,90 pour le capteur garrot. Selon le postulat de Rhodin, pour une boiterie antérieure les deux signaux doivent révéler de façon corrélée une réduction d'appui à droite (Fig. 19). Pour une boiterie postérieure, les deux signaux doivent être inversés : le signal tête doit révéler une asymétrie à droite et le signal garrot une asymétrie à gauche (Fig.20). Si les indices de symétrie se trouvaient dans la zone verte dite de cheval sain mais qu'ils évoquaient une tendance d'asymétrie à droite et que les indices de variabilité étaient élevés (>20%), l'allure était également considérée asymétrique et qualifiée d'asymétrie légère.



**Figure 19 :** Exemple d'une boiterie antérieure droite.

A gauche : résultat de l'enregistrement du capteur tête ;

A droite : résultat de l'enregistrement du capteur garrot.



**Figure 20 : Exemple d'une boiterie postérieure droite.**

**A gauche : résultat de l'enregistrement du capteur tête ;**

**A droite : résultat de l'enregistrement du capteur garrot.**

Sur l'ensemble des enregistrements, 19 ont révélé une asymétrie à droite. En fonction des valeurs des indices de symétrie et de variabilité, les asymétries ont été classées en rapport à leur sévérité. Huit enregistrements ont été associés à une asymétrie légère, huit à une asymétrie modérée et trois à une asymétrie intense. Dans ces 19 enregistrements, 14 sont associés à une asymétrie antérieure et 5 à une asymétrie postérieure.

### **c) Asymétries à gauche**

Une allure a été considérée asymétrique à gauche lorsque les indices de symétries étaient inférieurs à 0,90 pour le signal de tête et supérieurs à 1,11 pour le capteur garrot. Pour une boiterie antérieure, les deux signaux doivent révéler de façon corrélée une réduction d'appui à gauche. Pour une boiterie postérieure les deux signaux doivent être inversés : le signal tête doit révéler une asymétrie à gauche et le signal garrot une asymétrie à droite. Si les indices de symétrie se trouvaient dans la zone dite de cheval sain mais qu'ils évoquaient une tendance d'asymétrie à gauche et que les indices de variabilité étaient élevés (>20%), l'allure était également considérée asymétrique et qualifiée d'asymétrie légère.

Dix neuf enregistrements ont révélé une asymétrie à gauche. Tout comme pour les asymétries à droites, elles ont été classées en fonction de leur sévérité. Sept enregistrements ont été associés à une asymétrie légère, dix à une asymétrie modérée et

deux à une asymétrie intense. Dans ces 19 enregistrements, 13 sont associés à une asymétrie de l'antérieur gauche et 6 du postérieur gauche.

#### **d) Asymétries mal définies**

Certains enregistrements reflétaient une asymétrie de l'allure traduite par des valeurs anormales des indices de symétrie. Cependant, ces différentes asymétries n'ont pu être définies de façon claire. C'était le cas de 7 enregistrements dans lesquels plusieurs cas de figure étaient possibles. Le cas de figure le plus rencontré était une incohérence dans les valeurs des indices de symétrie pour un même un signal, c'est-à-dire que pour plusieurs allers-retours le signal tête (ou garrot) a rapporté des asymétries à la fois à droite et à gauche. Ainsi, face à ces informations, il a été difficile de définir clairement l'asymétrie présente.

## **2. Chevaux enregistrés sur le terrain**

Les quinze enregistrements « de terrain » ont été classés de la même manière que les précédents enregistrements : neuf ont révélé une allure symétrique, deux ont présenté une légère asymétrie à droite associée à une boiterie antérieure et 1 une légère asymétrie à gauche associée à une boiterie postérieure. Deux autres ont présenté une asymétrie moyenne à droite associé à une boiterie antérieure et le dernier a présenté une asymétrie sévère à gauche également associée à une boiterie antérieure. Ces trois derniers enregistrements correspondent aux observations de boiterie notées lors des enregistrements sur le terrain.

## **C. Corrélation entre le diagnostic vétérinaire et les données de l'analyse accélérométrique**

### **1. Bilan satisfaisant / allure symétrique**

Au sein de l'échantillon de vingt deux chevaux suivis par le Dr Baup ayant un bilan satisfaisant au vu de l'examen locomoteur, huit présentaient également une allure symétrique par analyse accélérométrique. Les quatorze autres chevaux ont, en revanche, été associés à une anomalie de l'allure par l'analyse objective : une asymétrie intense, six asymétries moyennes et sept asymétries légères.

D'autre part, deux enregistrements reflétant une allure symétrique ont été associés à un diagnostic de boiterie par le vétérinaire, la première étant une boiterie du postérieur droit gradée à 1/5 et la seconde une boiterie de l'antérieur droit également gradée à 1/5.

Ainsi, on obtient une corrélation de 36% entre le diagnostic de bilan satisfaisant du vétérinaire et la symétrie de l'allure obtenue par méthode accélérométrique, tandis que pour l'association inverse, la corrélation est de 80%.

### **2. Boiterie à droite / asymétrie à droite**

En comparant les diagnostics du vétérinaire avec les résultats de l'analyse accélérométrique, nous avons une correspondance de 69% (9 sur les 13 chevaux associés à un diagnostic vétérinaire de boiterie de l'antérieur droit ont révélé une asymétrie à droite suite à l'analyse accélérométrique) pour les boiteries de l'antérieur droit. Sur les six boiteries du postérieur droit diagnostiquées par le vétérinaire, quatre ont montré des signaux tête et garrot inversés tandis que les deux autres ont montré deux signaux révélant une asymétrie à droite qui correspondrait donc à une boiterie de l'antérieur droit. La corrélation était donc de 67% (4/6) pour les boiteries du postérieur droit.

L'étude des données accélérométriques a montré que trois des chevaux révélant une asymétrie antérieure droite présentaient un bilan locomoteur satisfaisant mais étaient diagnostiqués avec une dorsalgie. Nous avons considéré que les dorsalgies ne rentraient pas dans les critères de notre étude car il n'était pas possible de les associer à une boiterie antérieure ou postérieure.

Ainsi en retirant ces trois chevaux, la corrélation entre les résultats accélérométriques et le diagnostic du vétérinaire de boiterie antérieure droite était de 73% (8 sur les 11 enregistrements révélant une asymétrie antérieure droite ont été associés à un diagnostic de boiterie de l'antérieur droit). Pour les asymétries postérieures droites la corrélation était de 60% (3 sur les 5 enregistrements révélant une asymétrie postérieure droite ont été associés à un diagnostic de boiterie du postérieur droit).

### **3. Boiterie à gauche / asymétrie à gauche**

Pour ce qui est des boiteries à gauche, la corrélation entre les diagnostics de boiterie de l'antérieur gauche et les résultats accélérométriques était de 81% (9/11) et de 50% (1/2) pour les boiteries du postérieur gauche. Dans le cas des boiteries postérieures, l'un des deux enregistrements correspondait au schéma décrit par Rhodin [37], le second en revanche a révélé une asymétrie concomitante des deux signaux à droite correspondant donc plutôt à une boiterie antérieure.

L'analyse des enregistrements a montré que les deux chevaux ayant été diagnostiqués avec une anomalie en imagerie sans répercussion sur la locomotion étaient caractérisés par une asymétrie antérieure gauche. C'était également le cas du dernier cheval présentant une dorsalgie sans modification significative de la locomotion à l'examen vétérinaire ainsi que du cheval présentant un suros douloureux à la palpation au niveau de l'insertion du ligament suspenseur du boulet de l'antérieur gauche mais au bilan locomoteur satisfaisant.

Ainsi, en retirant ces quatre chevaux du calcul, la corrélation entre les résultats accélérométriques et le diagnostic vétérinaire de boiterie antérieure gauche était de 67% (6/9). Pour les boiteries postérieures gauches seuls deux chevaux avaient été diagnostiqués

avec une telle boiterie et sur ces deux aucunes n'a révélée une asymétrie à gauche à l'analyse accélérométrique. Ainsi, la corrélation entre les résultats accélérométriques et le diagnostic vétérinaire de boiterie postérieure gauche était nulle (0/6) mais peu significative aux vues du faible échantillon de chevaux diagnostiqués avec ce type de boiterie.

#### **D. Corrélation avec la gradation de la boiterie**

Nous venons d'étudier la corrélation entre les diagnostics du membre identifié boiteux du Docteur BAUP et les données de l'analyse accélérométrique, nous avons ensuite poursuivi l'étude en étudiant la corrélation avec la gradation des différentes boiteries. Pour cela, les enregistrements présentant un désaccord entre le diagnostic vétérinaire du membre boiteux et les résultats de l'analyse accélérométrique ont été retirés.

L'analyse des résultats accélérométriques corrélée aux différents grades de boiterie attribués par le vétérinaire a pour objectif d'établir une échelle de référence permettant la distinction des différents grades par le système Movin'Smart. L'obtention des intervalles de références et des différentes valeurs seuils vise à permettre de qualifier de façon plus précise les asymétries enregistrées par les capteurs. L'établissement de l'échelle de référence a été réalisé grâce aux calculs à partir des indices de symétries.

Pour les chevaux considérés sains, l'intervalle de référence a été établi dans la partie précédente. Nous avons donc admis que, lorsque les indices de symétrie calculés étaient compris entre 0,9 et 1,11, le cheval était non boiteux.

Les données obtenues avec les différents capteurs ont été analysées séparément. Pour chaque grade associé à la boiterie d'un membre défini, la moyenne et l'écart-type des indices de symétrie ont été calculés. Un exemple d'analyse des données, obtenues par le capteur tête, de l'ensemble des chevaux diagnostiqués avec une boiterie de grade 1/5 est présenté dans le tableau 3. Chaque indice de symétrie a été calculé pour une longueur de trot reconnu par le logiciel, les chevaux 1 et 4 ont effectué deux allers-retours au trot, quatre valeurs ont donc été obtenues. Le cheval 2 a également effectué deux allers-retours mais sur le deuxième retour l'indice de symétrie n'a pas été pris en compte car la valeur était

aberrante et associée à un indice de variabilité important mettant en évidence une interférence due à un écart du cheval au cours de l'enregistrement. Le cheval 3 a effectué un seul aller-retour.

	Cheval 1	Cheval 2	Cheval 3	Cheval 4
Indices de symétrie	0,98	1,03	1,02	1,01
	0,78	0,93	0,97	1,11
	1,23	1,13		1,20
	1,28			0,95

**Tableau 3 :** Indices de symétrie, obtenus par le capteur tête, pour les quatre chevaux diagnostiqués avec une boiterie de l'antérieur droit de grade 1/5.

Moyenne (M) :	1,05
Ecart type (E) :	0,14
M - E :	0,91
M + E :	1,19

**Tableau 4 :** Calculs de la moyenne et de l'écart-type de l'ensemble des indices de symétries repris dans le tableau 3.

**M-E :** Différence entre la moyenne et l'écart-type.

**M+E :** Addition de la moyenne et l'écart-type.

Après avoir sélectionné les chevaux dont le diagnostic et les résultats accélérométriques sont corrélés, ils ont été classés en fonction du membre atteint et du grade de boiterie associé.

Dans un premier temps l'analyse s'est portée uniquement sur les boiteries antérieures. Ainsi, pour une boiterie antérieure droite, quatre chevaux étaient associés à un grade de 1/5 et six à un grade 2/5. Pour une boiterie antérieure gauche, deux chevaux sont associés à un grade de 1/5, trois à un grade de 2/5 et trois autres à un grade de 3/5.

Les résultats sont présentés dans deux tableaux, le premier correspond aux données du capteur tête tandis que le second correspond à celles du capteur garrot (Tableaux 4 et 5).

Capteur tête	Boiterie MTD grade 1/5	Boiterie MTD grade 2/5	Boiterie MTG grade 1/5	Boiterie MTG grade 2/5	Boiterie MTG grade 3/5
Moyenne (M)	1,05	1,13	0,88	0,77	0,66
Ecart type (E)	0,14	0,14	0,09	0,11	0,17
M-E	0,91	1,00	0,79	0,66	0,48
M+E	1,19	1,27	0,97	0,88	0,83

**Tableau 5 :** Bilan des calculs des moyennes et écart types des indices de symétrie obtenus par le capteur tête de l'ensemble des chevaux dont le diagnostic et le résultat accélérométrique correspondent à une boiterie antérieure.

(MTD : membre thoracique droit ; MTG : membre thoracique gauche)

Capteur garrot	Boiterie MTD grade 1/5	Boiterie MTD grade 2/5	Boiterie MTG grade 1/5	Boiterie MTG grade 2/5	Boiterie MTG grade 3/5
Moyenne (M)	0,70	0,90	1,07	1,00	0,99
Ecart type (E)	0,10	0,07	0,09	0,23	0,11
M-E	0,87	0,82	0,98	0,77	0,87
M+E	1,07	0,97	1,15	1,24	1,10

**Tableau 6 :** Bilan des calculs des moyennes et écart types des indices de symétrie obtenus par le capteur garrot de l'ensemble des chevaux dont le diagnostic et le résultat accélérométrique correspondent pour une boiterie antérieure.

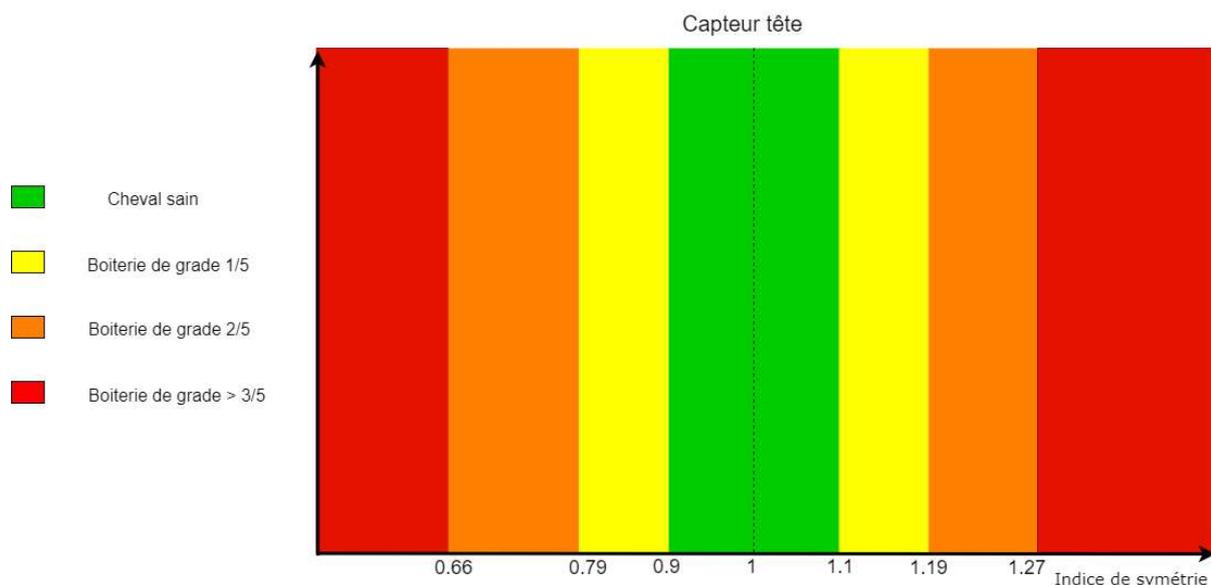
(MTD : membre thoracique droit ; MTG : membre thoracique gauche)

Ces différents calculs ont eu pour objectif de réaliser une échelle de référence plus précise que celle présentée sur le logiciel Movin'Smart. L'échelle initiale à trois couleurs faisait la distinction entre chevaux sains, douteux et boiteux, la nouvelle échelle à quatre couleurs permettrait une interprétation plus précise des données enregistrées par les capteurs en distinguant plusieurs intervalles correspondant aux grades de boiterie attribués par le vétérinaire. Les bornes des différents intervalles pourraient être définies à partir des valeurs calculées comme en amont. L'échelle serait composée de quatre intervalles faisant la distinction entre les boiteries de faibles grades (<3/5). Pour être véritablement applicable,

l'échantillon de chaque catégorie de chevaux aurait dû avoir un nombre minimal de chevaux beaucoup plus important que le nombre de chevaux dans notre étude. Ce manque de chevaux se voit également en étudiant les intervalles qui s'entrecroisent largement entre eux dans le tableau 6. Nous considérons donc que cette nouvelle échelle est un modèle qui serait à compléter avec un nombre de valeurs plus important.

Dans le cas du capteur tête, pour une boiterie de l'antérieur droit de grade 1/5 : la borne inférieure de l'intervalle serait la limite supérieure de la zone « cheval sain » tandis que la borne supérieure serait établie comme l'addition de la moyenne et de l'écart type des indices de symétrie (M+E) de l'ensemble des chevaux présentant ce type de boiterie. Il en va de même pour les grades suivants. Pour l'antérieur gauche, la borne supérieure serait la limite inférieure de la zone « cheval sain » tandis que la borne inférieure serait M-E de l'ensemble des chevaux présentant ce type de boiterie (Fig. 21).

Les intervalles contenant les boiteries gauches et droites supérieures à un grade de 3/5 ont été extrapolés à partir de la borne inférieure et supérieure, respectivement, des intervalles des boiteries de grade 2/5.



**Figure 21 :** Echelle de référence établie pour le capteur tête, distinguant les différents grades de boiteries.  
**Indices de symétrie > 1 = boiterie antérieur droit ;**  
**Indice de symétrie < 1 = boiterie antérieur gauche.**

Dans le cas du capteur garrot, les références sont inversées (boiterie à droite pour les indices inférieurs à 1) donc les valeurs choisies pour les bornes seront également inversées par rapport au capteur tête.

Aux vues des résultats obtenus pour le capteur garrot nous nous rendons compte que les intervalles sont plus réduits que pour le capteur tête. Cela s'explique par la moindre mobilité du garrot en comparaison avec le balancier de la tête du cheval exposé au cours de la première partie.

Il serait donc nécessaire d'établir une seconde échelle attribuée aux valeurs obtenues à partir du capteur garrot. Cependant, les données obtenues avec ce capteur (Tableau 6) ont montré que les indices de symétries associées aux boiteries de l'antérieur gauche de grade 3/5 ne révélaient pas de boiterie. Cette constatation met un doute sur la fiabilité des enregistrements du capteur étant donné le grade élevé de boiterie. Cela associé au fait que les intervalles étaient très restreints et se chevauchaient, les résultats de cette étude n'ont pas permis d'obtenir des données concluantes pour l'établissement d'une échelle de référence pour le capteur garrot.

L'échelle établie précédemment (Fig. 21) a été basée sur les mesures obtenues à partir de chevaux présentant une boiterie antérieure. Dans le cadre de notre étude, le petit échantillon de boiteries postérieures n'a pas permis l'établissement d'une échelle correspondant aux boiteries postérieures.

Dans l'hypothèse où nous pourrions considérer l'échelle établie comme exploitable, il a semblé intéressant de la confronter aux enregistrements des quinze chevaux non examinés par le Dr Baup. Selon l'échelle, neuf chevaux présentaient une allure symétrique de cheval sain. Les asymétries des six autres chevaux seraient qualifiées de façon plus précise. Le cheval présentant une asymétrie légère à gauche, présenterait une asymétrie compatible avec une boiterie postérieure gauche de grade 1/5. Les deux chevaux associés à une asymétrie légère à droite présenteraient une asymétrie compatible avec une boiterie antérieure droite de grade 2/5. Les deux chevaux associés à une asymétrie moyenne à

droite, présenteraient tous deux une asymétrie compatible avec une boiterie de grade supérieur à 3/5 très marquée pour le capteur tête et absente pour le capteur garrot. Cette différence allait en faveur d'une boiterie antérieure. Le dernier cheval, associé à une asymétrie sévère à gauche, présenterait une asymétrie compatible avec une boiterie de grade supérieur à 3/5, plus marquée pour le capteur garrot que pour le capteur tête (grade 2/5) ce qui suggèrerait que la boiterie était plutôt localisée sur le postérieur gauche.

## **IV. Discussion**

### **A. Discussion autour des objectifs**

Cette étude a permis de mettre en évidence des corrélations entre le diagnostic d'un vétérinaire et les résultats de l'analyse accélérométrique. Elle a ainsi permis l'élaboration d'un modèle d'échelle pouvant apporter une aide à la gradation de boiterie de faible grade. La faisabilité de la création d'une telle échelle est donc validée et notre premier objectif est atteint. Nous avons adapté un système accélérométrique d'évaluation de chevaux d'endurance à une utilisation vétérinaire sur le terrain. Nous avons également montré les avantages d'un tel outil et ses diverses utilisations envisageables en médecine vétérinaire.

Notre second axe d'étude portait sur la pertinence et l'apport d'informations d'un capteur accélérométrique positionné sur le garrot. Nous avons vu que, pour une boiterie antérieure, les données obtenues avec ce capteur confortent les résultats rapportés par le capteur tête bien que les modifications au niveau du garrot soient plus subtiles. En revanche, pour une boiterie postérieure, notre étude a montré que l'intérêt de son utilisation réside dans la différenciation d'une boiterie antérieure primaire et d'une boiterie antérieure de compensation secondaire à une boiterie postérieure initiale. Nous pouvons conclure que le capteur garrot n'est pas suffisant pour l'étude de boiteries postérieures non compensées par les membres antérieurs et que pour affiner les échelles établies il faudrait inclure un capteur placé sur la croupe ou y placer le capteur garrot. La fixation d'un capteur sur cette région est cependant plus complexe.

## **B. Analyse critique du protocole expérimental**

### **1. Limites liées au matériel choisi**

#### **a) Chevaux examinés par le Dr Bruno BAUP**

Les chevaux de cette étude ont été présentés de façon spontanée au Dr Bruno BAUP pour différents motifs. Cela a eu pour avantage d'élargir l'effectif de l'étude permettant d'obtenir un échantillonnage de pathologies très variées. Le désavantage a été l'absence de contrôle sur la répartition des boiteries antérieures et postérieures ainsi que sur les grades des boiteries ; ainsi notre échantillon s'est révélé non homogène sur ces critères. Il serait intéressant de faire un échantillonnage plus sélectif afin d'obtenir un plus grand nombre de données homogènement réparties.

Les chevaux examinés étaient tous des chevaux manipulés par leur propriétaire et débouffés, ce qui a permis de limiter les interférences de mouvement pouvant être liés à la mise en place de la sangle ou à la réalisation de l'examen locomoteur.

L'échantillon de chevaux enregistrés chez les propriétaires se rapprochait des conditions sur le terrain associées à une variation de sol et d'espace pouvant avoir des répercussions sur l'enregistrement. Cet échantillon a permis de tester directement l'efficacité du système en pratique sur le terrain et ce test s'est révélé plutôt concluant.

Au sein de ces différents échantillons, aucun critère d'âge ou de race n'ont été appliqués, la variation de morphologie ainsi obtenue a permis de développer un système indépendant du gabarit du cheval. Seul un critère de taille a été appliqué dans cette étude excluant les poneys de moins d'1m40 sur lesquels le système ne pouvait être adapté. En revanche, un ajustement de la sangle permettrait à priori une utilisation de ce système sur des poneys.

## **b) Qualités et positionnement du dispositif accélérométrique**

Les capteurs utilisés pour cette étude étaient de petites tailles et très légers (30 grammes). Leur sensibilité d'enregistrement de +/- 16g permet la capture de très faibles modifications de la locomotion du cheval. Par contre, l'élément limitant à leur utilisation a été leur fixation. En effet, le capteur tête a été fixé sur la têtière du filet ou du licol ce qui a impliqué un ajustement parfait du harnachement. Le capteur garrot, lui, a été fixé à l'aide de la sangle réglable confectionnée pour l'étude, mais sur les chevaux de trop petits gabarits (petits chevaux, doubles poneys), la sangle s'adaptait moins bien et il était possible que le dispositif tourne au cours de l'enregistrement faussant ainsi l'analyse.

Le dispositif est simple et rapide à mettre en place ce qui évite d'augmenter le temps d'examen du cheval. Cependant, il est indispensable que le téléphone soit embarqué pour permettre le transfert de données via Bluetooth, l'acquisition des données ne peut donc pas se faire à distance.

## **2. Limites liées à la méthode utilisée**

### **a) Protocole**

Les chevaux ont été soumis à un unique avis vétérinaire, hors il a été montré l'importance de la variabilité inter-évaluateur [18]. Il aurait été pertinent de soumettre les chevaux à plusieurs avis vétérinaires dans le but d'augmenter la corrélation entre diagnostic vétérinaire et analyse accélérométrique. Cela reste très fastidieux et peu réalisable sur le terrain.

Le choix d'un vétérinaire unique et expérimenté pour l'examen de l'ensemble des chevaux de l'étude et non pas un échantillonnage sur plusieurs cliniques a limité cette variabilité liée à l'observateur et à son expérience. Mais, en conséquence, l'échelle établie correspond à la classification du vétérinaire de notre étude plutôt qu'à une échelle de diagnostic universelle.

La standardisation du protocole de l'examen locomoteur a permis d'obtenir des enregistrements de même nature et a facilité l'interprétation du signal. Pour les chevaux examinés par l'investigateur de l'étude, le protocole était légèrement différent car pas de mise en cercle possible mais dans notre étude seules les zones de trotting ont été exploitées donc cette différence de protocole n'a pas interféré dans les résultats.

L'utilisation de la gradation AAEP a permis la généralisation de l'application du système se basant sur un gold standard de gradation de boiterie.

### **b) Traitement du signal accélérométrique**

L'utilisation du logiciel Movin'Smart a permis de s'appuyer sur un système déjà opérationnel. Bien que l'analyse accélérométrique soit déjà codée, il a tout de même fallu adapter le système au contexte et aux objectifs de l'étude. Le traitement du signal étant effectué par le logiciel, il n'est pas réalisé en instantané. Cela est une limite à l'utilisation sur le terrain de ce système qui nécessite un accès au logiciel.

En effet, bien que les données soient enregistrées en temps réel, une étape d'analyse sur logiciel est indispensable. L'application associée est une plateforme de traitement plus rapide et il serait intéressant de développer l'algorithme du logiciel sur cette application afin d'optimiser le temps d'analyse des données et de rendre possible l'analyse en simultané à l'examen locomoteur du vétérinaire sur le terrain.

Grâce à la dernière interface développée, la sélection manuelle de la zone de trotting a été facilitée. Les différentes étapes à suivre sont intuitives et le risque d'erreurs liées à l'utilisateur est réduit. L'interprétation des résultats est également simplifiée par l'utilisation d'une échelle associée à un code simple à trois couleurs. Cette échelle a été affinée permettant d'obtenir différents intervalles de références de tailles plus réduites et donc une interprétation plus précise des résultats. Comme nous l'avons vu l'échelle établie reste un modèle et serait à développer plus précisément avec un plus grand nombre de données afin d'obtenir des intervalles plus fiables.

L'établissement de ces échelles de références permettrait également une interprétation rapide des résultats mais il serait indispensable que les indices de variabilités soient également calculés afin de valider l'interprétation.

Un point qui n'a pas été évalué dans cette étude est la variabilité intra-individuelle des enregistrements afin d'étudier la répétabilité du système accélérométrique. Il aurait été envisageable de réaliser deux enregistrements, séparé par un intervalle de temps court, sur un même cheval et de les comparer afin d'évaluer le taux de différence entre les deux enregistrements.

Il serait également intéressant d'envisager de rétablir une norme identique pour les deux capteurs, c'est-à-dire que pour les deux, les indices de symétries supérieurs à 1 soient associés à une asymétrie à droite et à gauche pour les indices inférieurs à 1. Bien que cela n'ai pas d'incidence sur les résultats, cela faciliterait l'interprétation.

Une des grandes limites de ce dispositif a été la difficulté de distinction entre une boiterie antérieure et une boiterie postérieure. Le capteur garrot a représenté une aide dans ce sens mais pour l'instant, aucun signal spécifique d'une boiterie postérieure, qui aurait permis de s'assurer d'une interprétation correcte, n'a pu être mis en évidence au cours de cette étude. C'est une autre raison pour laquelle il est indispensable d'associer un examen visuel à l'utilisation de ce dispositif. Les résultats de notre étude ont montré que le capteur garrot n'était pas suffisant pour une étude complète de la locomotion du cheval et qu'il serait intéressant d'introduire un troisième capteur qui serait placé sur la croupe et permettrait de compléter le manque d'informations au niveau des postérieurs.

La distinction entre une asymétrie légère pathologique et une asymétrie non pertinente cliniquement est difficile à établir sur ce système. Cela constitue une limite à l'utilisation de l'accélérométrie et conforte l'idée de l'utilisation de ce système en tant qu'outil d'aide au diagnostic accompagnant le vétérinaire et non pour une utilisation par un particulier.

## **C. Analyse critique des résultats**

### **1. Analyse des résultats du diagnostic vétérinaire**

Sur l'ensemble des chevaux examinés par le Dr BAUP, environ 60% d'entre eux ont présenté une boiterie diagnostiquée par le praticien. Cela représentait un total de 35 chevaux boiteux dont trois non quantifiables. En les classant en fonction du membre affecté, nous avons obtenu des échantillons de tailles différentes : 13, 11, 6 et 2. Pour que la taille de l'échantillon permette une exploitation des données significative, il faudrait que chaque échantillon comprenne un minimum de huit chevaux ; ce qui n'était pas le cas pour les deux derniers groupes correspondant aux boiteries postérieures. Ainsi, nous avons manqué de données de boiteries postérieures. De même, bien que le nombre de boiteries antérieures était supérieur à celui des boiteries postérieures, une fois classées en fonction du grade de boiterie attribué par le vétérinaire, les échantillons étaient de très petites tailles et les conclusions tirées à partir de ces données sont difficilement significatives et doivent être interprétées avec précaution.

Comme nous l'avons vu dans la partie de l'analyse du protocole, le choix d'un unique vétérinaire nous a permis de construire un modèle d'échelle correspondant à ce vétérinaire et ne permet pas une extrapolation large.

### **2. Analyses des résultats accélérométriques**

Le faible nombre d'enregistrements révélant une allure symétrique (10/55) comparé au nombre de bilans locomoteurs satisfaisants attribués par le Dr BAUP (22/55), a confirmé la haute sensibilité des capteurs.

Sur l'ensemble des enregistrements, sept révélaient une asymétrie mal définie rendant ces enregistrements inexploitable dans le cadre de notre étude. Le fait que l'analyse soit ultérieure à l'examen du cheval est une limite car il n'était pas possible de connaître la qualité de l'enregistrement et donc de le réitérer si nécessaire. Ainsi, il n'est pas possible de

conclure sur la qualité de l'allure d'un cheval en ne se basant que sur l'analyse accélérométrique.

Sur l'ensemble des enregistrements associés à une boiterie antérieure de faible grade, les indices de symétrie associés au signal garrot étaient compris entre 0,9 et 1,1 donc dans l'intervalle de référence « cheval sain ». En revanche lorsque le grade de boiterie dépassait 3/5, le signal garrot révéla, conjointement au signal tête, une asymétrie plus marquée. Ces observations sont en accord avec les phénomènes mis en évidence dans d'autres études montrant que le garrot présente une amplitude bien moindre en comparaison aux mouvements de la tête et que c'est bien le balancier cervico-céphalique qui est le plus altéré dans le cas de boiteries antérieures [20].

La limite la plus importante de ce système a été la difficulté d'identifier de manière précise une boiterie postérieure, bien que la divergence des signaux tête et garrot semble apporter une information significative dans la distinction d'une asymétrie de mouvement de tête due à une boiterie antérieure et d'un mouvement de tête compensatoire causé par une boiterie postérieure primaire.

### **3. Analyse de la corrélation entre les deux résultats**

En comparant les résultats diagnostics et accélérométriques, nous avons vu que les pourcentages de corrélations entre la méthode accélérométrique et le diagnostic vétérinaire étaient plus élevés que pour la corrélation contraire. Thomsen en 2010 a montré qu'il existait une corrélation significative entre la gradation AAEP et l'analyse accélérométrique [39]. Cette affirmation rend l'analyse comparative pertinente dans le cadre de notre étude.

Dans le cas des chevaux sains, seulement 36% des diagnostics de bilans locomoteurs satisfaisants étaient associés à une symétrie de l'allure reflétée par les données obtenues grâce aux capteurs. En revanche, 80% des enregistrements présentant une allure symétrique étaient associés un bilan locomoteur satisfaisant. Cela montre la grande sensibilité des capteurs à enregistrer une modification de l'allure. Il faut cependant être vigilant à ne pas

sélectionner une sensibilité trop importante qui prendrait en compte un défaut d'allure qui ne serait pas pathologique et associée à l'individu [17]. Nous abordons ici une limite de l'utilisation d'un système accélérométrique qui n'a pas la capacité de différencier une asymétrie légère pertinente cliniquement d'une asymétrie non pertinente cliniquement.

Dans le cas de figure où l'enregistrement montrait une allure symétrique alors qu'un diagnostic de boiterie avait été établi, il est difficile de donner une explication et l'idéal serait de renouveler l'examen et donc l'enregistrement. Ce cas s'est présenté pour deux enregistrements, mais il n'a pas été possible de renouveler l'examen de ces chevaux, l'analyse étant faite à postériori.

Dans le cas des diagnostics de boiteries, les corrélations étaient meilleures : respectivement 69% et 67% pour les boiteries antérieures et postérieures droites, et 81 % pour les boiteries antérieures gauches, des boiteries diagnostiquées par le vétérinaire étaient associées à une asymétrie révélée par les enregistrements. Une correspondance de 50% a été mise en évidence pour les boiteries postérieures gauches mais cette valeur n'est pas significative pour cause de manque de données.

Pour ce qui est de la corrélation entre les résultats accélérométriques et le diagnostic du vétérinaire de boiterie les corrélations étaient moins variables hormis pour les boiteries postérieures gauches dont la valeur de la corrélation n'est pas significative. Pour les boiteries antérieures, la corrélation était de 73% pour l'antérieur droit et de 67% pour l'antérieur gauche. Pour les boiteries postérieures droites la corrélation était de 60%.

L'échelle établie en se basant sur le diagnostic du vétérinaire a été façonnée en fonction des grades de boiteries attribués par le Dr BAUP. Le nombre de chevaux par catégories étant insuffisant ; cette échelle est actuellement, uniquement un modèle à affiner. Cette échelle permettrait l'appréciation de la symétrie de l'allure enregistrée. Il est tout de même important de noter que notre analyse accélérométrique a été réalisée uniquement au trot et ne peut donc pas être une interprétation directe puisque la gradation d'une boiterie est à établir au cours d'un examen locomoteur complet et pas seulement sur un trotting. La modification de l'allure, le 8 de chiffre et la mise en longe apportent, en effet, des éléments essentiels pour le diagnostic de boiterie. Tout comme les tests de flexion ou de

la pince qui vont permettre de localiser plus précisément l'origine de la boiterie ainsi que sa cause. L'ensemble de ces informations ne pourront être obtenues sur un trotting seul.

En l'absence d'un examen complet, nous parlerons donc plutôt d'une asymétrie que d'une boiterie. C'est ce que Weeren a publié en 2017, qui, en s'interrogeant sur la définition de la boiterie à l'ère de l'analyse objective de la locomotion du cheval, alerte sur l'utilisation des termes boiterie et asymétrie [40].

En prenant en compte les résultats de notre étude, il semblerait intéressant et pertinent de pouvoir la compléter en envisageant la mise en place d'un capteur croupe, l'augmentation de la population d'étude en élargissant à la clientèle de plusieurs vétérinaires et l'établissement d'une échelle de référence basée sur un plus grand nombre de cas avec des boiteries réparties de façon homogène.

L'enregistrement de l'ensemble de l'examen dynamique n'était pas indispensable dans le cadre de notre étude mais a permis le stockage d'un important nombre de données qui pourra être exploitées ultérieurement lorsque le système aura la capacité d'exploiter les données obtenues aux trois allures.

Dans le cadre de cette étude, nous ne nous sommes concentrés que sur les portions de trotting en ligne droite mais l'objectif final serait d'élaborer un système permettant également l'analyse de l'ensemble des allures, fournissant ainsi une analyse accélérométrique d'ensemble se rapprochant plus du diagnostic vétérinaire.



## CONCLUSION

Au cours de cette étude nous avons montré l'importance d'une approche méthodique et approfondie de l'appareil locomoteur du cheval. Les boiteries ayant une place prédominante dans l'activité du vétérinaire équin, le développement d'outils lui donnant accès à un nombre d'informations plus important semble pertinent. L'examen locomoteur est très complet et standardisé, il apporte de nombreuses réponses, cependant il reste un examen subjectif dont l'interprétation est observateur-dépendant. Les diverses études réalisées sur ce sujet ont mis en avant l'avantage de l'utilisation de méthodes objectives comme les méthodes cinématiques et cinétiques dans l'examen de boiterie.

La méthode cinétique, et en particulier l'analyse accélérométrique constituée d'un dispositif léger et simple à mettre en place associé à une capacité de stockage importante, présente un véritable intérêt pour ce type d'utilisation. Le système Movin'Smart, choisi pour cette étude, correspond à tous les critères fixés. Ce travail expérimental a permis d'augmenter la performance de ce système notamment par l'établissement d'un modèle d'échelle de référence, permettant la distinction des boiteries de faibles grades, à l'aide de la corrélation entre l'analyse accélérométrique et les diagnostics vétérinaires posés par le Docteur Bruno BAUP. Nous avons pu constater l'efficacité de l'analyse accélérométrique en particulier pour les boiteries antérieures ; pour les boiteries postérieures une étude plus approfondie serait nécessaire en ajoutant un capteur de croupe afin d'obtenir une interprétation plus concluante. La pertinence et les avantages de l'utilisation d'un tel système ont été montrés dans différents domaines : diagnostique, thérapeutique et même juridique.

Cette étude est en faveur de l'utilisation du système accélérométrique, en association avec l'examen locomoteur, dans le cadre du diagnostic de boiterie. Ce système serait cependant un outil dédié à une utilisation strictement vétérinaire et professionnelle, l'œil et le sens clinique du vétérinaire gardant une part importante dans le cadre de l'examen locomoteur.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. J. Dyson, « The clinician's eye view of hindlimb lameness in the horse: Technology and cognitive evaluation », *Equine Vet. J.*, vol. 41, n° 2, p. 99-100, févr. 2009, doi: 10.2746/042516409X399963.
- [2] Denoix JM, « Approche sémiologique des boiteries chez le cheval : premières étapes. . », vol. Le Point Vétérinaire: revue d'enseignement post-universitaire et de formation permanent, n° vol 23 n°142, p. 15-27, 1992.
- [3] T. A. Turner, « Examination of the equine foot », *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, vol. 19, n° 2, p. 309-332, août 2003, doi: 10.1016/S0749-0739(03)00023-3.
- [4] Chateau H et Camus M, « Kinetics of the forelimb in horses circling on different ground surfaces at the trot », *Vet. J.*, vol. 198, p. 20-26, déc. 2013.
- [5] M. Hammarberg, A. Egenvall, T. Pfau, et M. Rhodin, « Rater agreement of visual lameness assessment in horses during lungeing: Rater agreement of visual lameness assessment during lungeing », *Equine Vet. J.*, vol. 48, n° 1, p. 78-82, janv. 2016, doi: 10.1111/evj.12385.
- [6] AAEP, « AAEP lameness scale ».
- [7] F. Audigié, P. Pourcelot, C. Degueurce, D. Geigert, et J.-M. Denoix, « Kinematic analysis of the symmetry of limb movements in lame trotting horses », *Equine Vet. J.*, vol. 33, n° S33, p. 128-134, avr. 2001, doi: 10.1111/j.2042-3306.2001.tb05375.x.
- [8] M. A. F. Lopes *et al.*, « An attempt to detect lameness in galloping horses by use of body-mounted inertial sensors », *Am. J. Vet. Res.*, vol. 77, n° 10, p. 1121-1131, oct. 2016, doi: 10.2460/ajvr.77.10.1121.
- [9] Kramer J, Keegan K, et Kelmer G, « Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences. », *Am. J. Vet. Res.*, vol. 6, n° 65, p. 741-747, 2004.
- [10] Denoix JM, « Anesthésie diagnostique nerveuse digitale distale », *Reccueil Med. Vét.*, n° 171, p. 707-715, 1995.
- [11] K. W. Hinchcliff, Éd., *Equine sports medicine and surgery: basic and clinical sciences of the equine athlete*, 2. ed., vol. chap 13-p230. Edinburgh: Saunders Elsevier, 2014.
- [12] Derksen FJ, « Diagnostic local anesthesia of the equine front limb », *Equine Pract.*, p. 41-47, 1980.
- [13] A. Nagy, J. K. Murray, et S. J. Dyson, « Descriptive epidemiology and risk factors for eliminations from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons (2008-2011): Eliminations from endurance rides », *Equine Vet. J.*, vol. 46, n° 1, p. 38-44, janv. 2014, doi: 10.1111/evj.12069.
- [14] Misheff MM, « Description of the sport and veterinary controls », in *Lameness in endurance horses*, 2011, p. 1130-1150.

- [15] Seguin A, « Contrôles vétérinaires en course d'endurance : critères d'alerte. », *Proceeding de l'AVEF : Session endurance.*, Deauville, p. 130-132, 2007.
- [16] K. G. Keegan *et al.*, « Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses: Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses », *Equine Vet. J.*, vol. 42, n° 2, p. 92-97, févr. 2010, doi: 10.2746/042516409X479568.
- [17] M. A. F. Lopes, A. Eleuterio, et M. C. Mira, « Objective Detection and Quantification of Irregular Gait With a Portable Inertial Sensor-Based System in Horses During an Endurance Race—a Preliminary Assessment », *J. Equine Vet. Sci.*, vol. 70, p. 123-129, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jevs.2018.08.008.
- [18] M. J. McCracken *et al.*, « Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation: Comparison of inertial system with subjective lameness evaluation », *Equine Vet. J.*, vol. 44, n° 6, p. 652-656, nov. 2012, doi: 10.1111/j.2042-3306.2012.00571.x.
- [19] S. Drevemo, G. Dalin, I. Fredricson, et G. Hjerten, « Equine locomotion: 1. The analysis of linear and temporal stride characteristics of trotting Standardbreds », *Equine Vet. J.*, vol. 12, n° 2, p. 60-65, avr. 1980, doi: 10.1111/j.2042-3306.1980.tb02310.x.
- [20] H. H. F. Buchner, H. H. C. M. Savelberg, H. C. Schamhardt, et A. Barneveld, « Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness », *Equine Vet. J.*, vol. 28, n° 1, p. 71-76, janv. 1996, doi: 10.1111/j.2042-3306.1996.tb01592.x.
- [21] K. G. Keegan, « Evidence-Based Lameness Detection and Quantification », *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, vol. 23, n° 2, p. 403-423, août 2007, doi: 10.1016/j.cveq.2007.04.008.
- [22] C. Uhler, T. Licka, P. Kübber, C. Peham, M. Scheidl, et D. Girtler, « Compensatory movements of horses with a stance phase lameness », *Equine Vet. J.*, vol. 29, n° S23, p. 102-105, mai 1997, doi: 10.1111/j.2042-3306.1997.tb05065.x.
- [23] E. Barrey, « Methods, Applications and Limitations of Gait Analysis in Horses », *Vet. J.*, vol. 157, n° 1, p. 7-22, janv. 1999, doi: 10.1053/tvj.1998.0297.
- [24] H. M. Clayton, J. L. Lanovaz, H. C. Schamhardt, et R. Wessum, « The effects of a rider's mass on ground reaction forces and fetlock kinematics at the trot », *Equine Vet. J.*, vol. 31, n° S30, p. 218-221, juin 2010, doi: 10.1111/j.2042-3306.1999.tb05221.x.
- [25] Pourcelot P, Audigié F, et Denoix JM, « kinematic symmetry index: a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. », *Vet. Res.*, vol. 6, p. 525-538, 1997.
- [26] I. Fredricson, S. Drevemo, G. Dalin, G. Hjerten, et K. Björne, « The application of high-speed cinematography for the quantitative analysis of equine locomotion », *Equine Vet. J.*, vol. 12, n° 2, p. 54-59, avr. 1980, doi: 10.1111/j.2042-3306.1980.tb02309.x.
- [27] M. M. S. Oldruijtenborgh-Oosterbaan et H. M. Clayton, « Advantages and disadvantages of track vs. treadmill tests », *Equine Vet. J.*, vol. 31, n° S30, p. 645-647, juin 2010, doi: 10.1111/j.2042-3306.1999.tb05305.x.

- [28] Barrey E et Galloux P, « Stride characteristics of overground versus treadmill locomotion in the saddle horse », *Acta Anat. (Basel)*, vol. 146, p. 90-94, 1993.
- [29] H. M. Clayton, H. C. Schamhardt, M. A. Willemsen, J. L. Lanovaz, et G. R. Colborne, « Kinematics and ground reaction forces in horses with superficial digital flexor tendinitis », *Am. J. Vet. Res.*, vol. 61, n° 2, p. 191-196, févr. 2000, doi: 10.2460/ajvr.2000.61.191.
- [30] M. A. Weishaupt, H. P. Hogg, T. Wiestner, J. Denoth, E. Stussi, et J. A. Auer, « Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses », *Am. J. Vet. Res.*, vol. 63, n° 4, p. 520-527, avr. 2002, doi: 10.2460/ajvr.2002.63.520.
- [31] E. Barrey, M. Hermelin, J. L. Vaudelin, D. Poirel, et J. P. Valette, « Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis », *Equine Vet. J.*, vol. 26, n° S17, p. 7-12, juin 2010, doi: 10.1111/j.2042-3306.1994.tb04864.x.
- [32] M. Halling Thomsen, A. Tolver Jensen, H. Sørensen, C. Lindegaard, et P. Haubro Andersen, « Symmetry indices based on accelerometric data in trotting horses », *J. Biomech.*, vol. 43, n° 13, p. 2608-2612, sept. 2010, doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.05.004.
- [33] « Barrey Desbrosses 1996.pdf ». .
- [34] Barrey E et Desbrosse F, « Lameness detection using an accelerometric device », *Pferdeheikunde*, n° 12, p. 617-622, 1996.
- [35] K. G. Keegan, P. F. Pai, D. A. Wilson, et B. K. Smith, « Signal decomposition method of evaluating head movement to measure induced forelimb lameness in horses trotting on a treadmill », *Equine Vet. J.*, vol. 33, n° 5, p. 446-451, janv. 2010, doi: 10.2746/042516401776254781.
- [36] F. M. Bragança *et al.*, « Validation of distal limb mounted inertial measurement unit sensors for stride detection in Warmblood horses at walk and trot », *Equine Vet. J.*, vol. 49, n° 4, p. 545-551, juill. 2017, doi: 10.1111/evj.12651.
- [37] M. Rhodin *et al.*, « Vertical movement symmetry of the withers in horses with induced forelimb and hindlimb lameness at trot », *Equine Vet. J.*, vol. 50, n° 6, p. 818-824, nov. 2018, doi: 10.1111/evj.12844.
- [38] E. E. Church, A. M. Walker, A. M. Wilson, et T. Pfau, « Evaluation of discriminant analysis based on dorsoventral symmetry indices to quantify hindlimb lameness during over ground locomotion in the horse », *Equine Vet. J.*, vol. 41, n° 3, p. 304-308, mars 2009, doi: 10.2746/042516409X397352.
- [39] M. H. Thomsen, A. B. Persson, A. T. Jensen, H. Sørensen, et P. H. Andersen, « Agreement between accelerometric symmetry scores and clinical lameness scores during experimentally induced transient distension of the metacarpophalangeal joint in horses: Agreement between accelerometric symmetry scores and lameness score », *Equine Vet. J.*, vol. 42, p. 510-515, nov. 2010, doi: 10.1111/j.2042-3306.2010.00287.x.
- [40] P. R. Weeren, T. Pfau, M. Rhodin, L. Roepstorff, F. Serra Bragança, et M. A. Weishaupt, « Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis? », *Equine Vet. J.*, vol. 49, n° 5, p. 567-569, sept. 2017, doi: 10.1111/evj.12715.



TOULOUSE, 2020

**Surname** : CHARBONNEL

**Given name** : Anna

**Title** : objective detection of irregular gait with portable inertial sensor-based system in the horse.

**Summary :**

When approaching the locomotor examination of the horse, numerous authors have been focusing on developing an objective assessment of lameness. The use of an accelerometric analysis comes with many assets including an easy set up and functioning and a large data storage capacity. In this context, the objective of our study is to correlate the results of an accelerometric analysis with a veterinary diagnosis of the same lameness, the ultimate goal being the development of an objective tool to evaluate the horse locomotion. Our main objective is to focus on low grade lameness. The software Movin'Smart designed by Movin'Smart company has allowed us to evaluate 57 horses under the supervision of Dr Bruno BAUP, DVM.

Each recording has permitted the analysis of dorsoventral acceleration plot coupled with the calculation of symmetry and gait regularity indexes.

The results illustrate a significant correlation between the accelerometric measures and the veterinary diagnosis allowing the establishment of a reference scale for low grade lameness diagnosis.

Concerning hind limb lamenesses the findings are more restricted compared with fore limb lamenesses due to fewer cases included in our study. However, the use of this system is recommended and numerous applications are to be considered.

**Keywords** : accelerometric method, horse locomotion, irregular gait, lameness.

**Jury :**

President : Pr Bettina Couderc

Director : Dr Elodie Lallemand

Assessor : Dr Aude Ferran

**Author's address :**

Mlle Anna Charbonnel

317 chemin de Barran

32000 Auch - FRANCE