

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE, AGROALIMENTAIRE ET DE
L'ALIMENTATION – ONIRIS

ANNÉE 2020

**COMPARAISON DE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE ET
OBJECTIVE DES BOITERIES PAR UN SYSTÈME
D'ACCÉLÉROMÉTRIE CHEZ LE
TROTTEUR EN MAIN PUIS ATTELÉ :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

THESE
Pour le
diplôme d'Etat de
DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement
le 29 Octobre 2020
devant
la Faculté de Médecine de Nantes
Par

Philippine POINSARD

Né(e) le 4 mars 1994 à Neuilly-sur-Seine (Hauts- de-Seine)

JURY
Président : M. Maugars
Membres : Mme Caroline Tessier Rapporteur
M. Claude Guintard Assesseur
M. Sébastien Caure Membre invité

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE, AGROALIMENTAIRE ET DE
L'ALIMENTATION – ONIRIS

ANNÉE 2020

**COMPARAISON DE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE ET
OBJECTIVE DES BOITERIES PAR UN SYSTÈME
D'ACCÉLÉROMÉTRIE CHEZ LE
TROTTEUR EN MAIN PUIS ATTELÉ :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

THESE
Pour le
diplôme d'Etat de
DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement
le 29 Octobre 2020
devant
la Faculté de Médecine de Nantes
Par

Philippine POINSARD

Né(e) le 4 mars 1994 à Neuilly-sur-Seine (Hauts- de-Seine)

JURY
Président : M. Maugars
Membres : Mme Caroline Tessier Rapporteur
M. Claude Guintard Assesseur
M. Sébastien Caure Membre invité

CORPS ENSEIGNANT DE LA FORMATION VÉTÉRINAIRE ONIRIS

Département BPSA Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment		
Responsable : Hervé POULIQUEN - adjoint : Emmanuel JAFFRES		
Nutrition et endocrinologie	Patrick NGuyen* (Pr)	
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude Desfontis (Pr) Yassine Mallem (Pr) Antoine Rostang (MCC)	Martine Kammerer (Pr) Hervé Pouliquen* (Pr)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Jean-Marie Bach (Pr) Lionel Martignat (Pr)	Julie Herve (MC) Grégoire Mignot (MC)
Histologie et anatomie pathologique	Jérôme Abadie* (MC) Laetitia Jaillardon* (MC)	Marie-Anne Colle* (Pr) Frédérique Nguyen* (MC)
Pathologie générale, microbiologie et immunologie	François Meurens (Pr) Jean-Louis Pellerin* (Pr)	Emmanuelle Moreau (MC HDR) Hervé Sebbag (MC)
Biochimie alimentaire industrielle	Clément Cataneo (MC) Laurent Le Thuaut (MC) Thierry Serot (Pr)	Joëlle Grua (MC) Carole Prost (Pr) Florence Texier (MC)
Microbiotech	Géraldine Boue (MC) Emmanuel Jaffres (MC) Raouf Tareb (MCC) Bénédicte Sorin (IE)	Nabila Haddad (MC) Mathilde Mosser (MC) Hervé Prevost (Pr)
Département SAESP Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique		
Responsable : Alain CHAUVIN - adjoint : Raphaël GUATTEO		
Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel Cappelier* (Pr) Michel Federighi (Pr) Catherine Magras* (Pr) Fanny Renois -Meurens (MC)	Eriic Dromigny (MC HDR) Bruno Le Bizec (Pr) Marie-France Pilet(Pr)
Médecine des animaux d'élevage	Sébastien Assie* (MC) Isabelle Breyton (MC) Alain Douart* (MC) Mily Leblanc Maridor (MC) Anne Relun (MCC)	Catherine Belloc* (Pr) Christophe Chartier* (Pr) Raphaël Guatteo* (Pr)
Parasitologie, aquaculture, Faune sauvage	Albert Agoulon (MC) Ségolène Calvez (MC) Nadine Ravinet (MC)	Suzanne Bastian (MC) Alain Chauvin* (Pr)
Maladies réglementées, zoonoses et réglementation sanitaire	Carole Peroz (MC)	Nathalie Ruvoen* (Pr)
Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie Bareille* (Pr) Christine Fourichon* (Pr HDR) Henri Dumon* (Pr) Lucile Martin (Pr)	François Beaudeau* (Pr) Aurélien Madouasse (MC) Nora Navarro-Gonzalez (MCC)

Département DSC Sciences Cliniques		
Responsable : Catherine IBISCH – adjoint : Olivier GAUTHIER		
Anatomie comparée	Eric Betti (MC) Claude Guintard (MC)	Claire Douart (MC)
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Eric Aguado (MC HDR) Eric Goyenvallé (MC HDR) Caroline Tessier* (MC)	Olivier Gauthier (Pr) Béatrice Lijour (MC) Gwénola Touzot-Jourde* (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Patrick Bourdeau* (Pr)	Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Nora Bouhsina (MCC) Anne Courouze * (Pr) Amandine Drut* (MC) Catherine Ibsich (MC) Odile Senecat (MC)	Nicolas Chouin (MC) Jack-Yves Deschamps (Pr) Marion Fusellier-Tesson (MC) Françoise Roux* (Pr)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Djemil Bencharif (MC HDR) Jean-François Bruyas* (Pr)	Lamia Briand (MC HDR) Francis Fieni* (Pr)
Département GPA Génie des Procédés Alimentaires		
Responsable : Olivier ROUAUD - adjoint : Sébastien CURET-PLOQUIN		
Lionel Boillereaux (Pr) Marie De Lamballerie (Pr) Francine Fayolle (Pr) Vanessa Jury (MC) Alain Lebail (Pr) Jean-Yves Monteau (MC HDR) Laurence Pottier (MC) Cyril Toubanc (MC)	Sébastien Curet Ploquin (MC) Dominique Della Valle (MC HDR) Michel Havet (Pr) Emilie Korbel (MCC) Catherine Loisel (MC) Olivier Rouaud (Pr) Eve-anne Norwood (MCC)	
Département MSC Management, Statistiques et Communication		
Responsable : Michel SEMENOU - adjoint Pascal BARILLOT		
Mathématiques, statistiques, Informatique	Véronique Cariou (MC) El Mostafa Qannari (Pr) Chantal Thorin (Pr AG.)	Philippe Courcoux (MC) Michel Semenou (MC) Evelyne Vigneau (Pr)
Economie, gestion	Pascal Barillot (MC) Florence Beaugrand (MC) Sonia EL Mahjoub (MC) Samira Rousseliere (MC)	Ibrahima Barry (MCC) Sibylle Duchaine (MC) Jean-Marc Ferrandi (Pr)
Langues et communication	Marc Bridou (PLPa) David Guylér (ens. cont.) Shaun Meehan (ens. cont.)	Franck Insignares (IE) Linda Morris (PCEA)

BTs : **Laurence Freret (PCEA)** Christophe Caron (PLPA), Pascale Fleury (PCEA), Virginie Magin (Ens. Cont.), Françoise Brichet (IAE).

Professeurs émérites : Poncelet

guide de lecture des tableaux suivants : Pr : Professeur, Pr. AG : Professeur agrégé. MC : maître de Conférences, MCC : MC contractuel, PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole, PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole, IE : Ingénieur d'Etudes ; IAE : Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement ; ens. cont. : enseignant contractuel; HDR : Habilité à Diriger des Recherches

* Vétérinaire spécialiste d'une spécialité européenne, américaine ou française

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur,

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

Hommages respectueux.

A Madame le Docteur Caroline Tessier,

De l'École Nationale Vétérinaire de Nantes, qui m'a fait l'honneur de participer à la direction de cette thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur Sébastien Caure,

Du Centre Hospitalier Vétérinaire de Livet, qui m'a fait l'honneur et le plaisir de diriger cette thèse. Je vous remercie chaleureusement de tout votre soutien et les moments de partage que nous avons pu avoir durant ces trois années d'élaboration du projet ainsi que toutes les connaissances que vous avez eu joie de me transmettre aux cours de nos différents échanges.

Remerciements chaleureux.

A Monsieur le Docteur Claude Guintard,

De l'École Nationale Vétérinaire de Nantes, qui m'a fait l'honneur et le plaisir d'être mon assesseur. Je vous remercie pour tous nos échanges enrichissants durant ces cinq dernières années, votre soutien et vos conseils.

Remerciements chaleureux

REMERCIEMENTS PERSONNELS

A mes parents,

Pour leur inconditionnel soutien et amour durant ces nombreuses années d'études passées et à venir... Vous avez été présents tout au long des étapes de ma scolarité et de ma vie et m'avez transmis des valeurs qui aujourd'hui m'ont permis de réussir. Aucun mot, aucune parole ne peut transmettre l'amour qui nous relie. Merci pour l'aide que vous m'avez apporté, la patience, la dévotion même pour que je puisse intégrer l'école vétérinaire qui était mon rêve depuis si longtemps. Je vous dois mon diplôme dans sa plus grande partie. Merci d'être là chaque jour, de tous ces moments passés ensemble le WE. Je ne pense pas que beaucoup d'enfants puisse aujourd'hui rêver meilleure entente avec ses parents, alors un immense merci pour tout ce que vous avez fait et faites encore pour moi chaque jour.

A ma grand-mère, pour tout l'amour que tu m'apportes chaque jour à distance, pour tous ces petits messages d'attention qui me touche, pour la relecture de cette thèse et pour tous les moments que nous partageons et partagerons encore longtemps... Tu es toujours été un soutien considérable dans mes études en m'apportant ton savoir, en me partageant tes lectures, en m'accompagnant à mes différentes activités après les cours et tu m'as transmis de belles valeurs de vie que j'espère conserver tout au long de ma vie.

A mon frère Arthur et ma sœur Alice, que je vois malheureusement peu mais qui sont toujours présents dans mon cœur. Qui ont toujours été présents dans la poursuite de mes études. Je vous souhaite également de belles années d'études à Paris ou en Belgique et la meilleure réussite professionnelle après. Éclatez-vous dans vos études et dans votre vie. A très bientôt pour un Noël préparé le 24 décembre à 18h59 !

A Laurent, pour ton amour et ton soutien chaque jour notamment durant ces dernières nuits blanches avant que je ne boucle définitivement ce manuscrit. Merci pour tout ce que tu m'apportes chaque jour et pour tout ce que tu fais pour mes petits chevaux en mon absence.

A mes amis,

A mes colocs, pour ces 5 années de colocation passées ensemble. Une 4^{ème} année me disait l'autre jour que des colocataires, ce ne sont plus que des amis mais pas tout à fait de la famille. Elle a entièrement raison, j'ai passé des années faites de complicité, d'échanges, de before, d'after, de barbecues, de révisions de partiels. L'Asile restera toujours dans mon cœur alors merci pour tout !

A mon Maxou, mon TAC de clinique, mon binôme de toujours. A tous ces moments passés, et il y en a eu beaucoup... en clinique, en stage et ailleurs, à cette complicité que nous avons eu pendant toutes ces années et qui j'espère perdurera encore longtemps ! Tu as été une source énorme de motivation, de soutien quand il fallait se lever le matin pour aller faire encore une série d'exams cliniques. J'espère de tout cœur que tu vas t'éclater dans ta nouvelle voie. Je pense fort à toi et si jamais... il te restera toujours une place à Equiphimax !! La nouvelle gamme de compléments alimentaires et autre poudre de perlimpinpin t'attends !

A mon groupe de canine de 4^{ème} année, Marine, Jojo, Julien, Sandra et Bartira pour cette fabuleuse première année de clinique que nous avons vécu ensemble. Des moments de folie, de joie, de découverte qui resteront gravés dans ma mémoire. A tous ces apéros au bord de la Chantr', ces WE à Saint-Jean de Monts, à Sarzeau, à Madrid passés ensemble. J'espère de tout cœur pouvoir revivre ces moments avec vous, où que vous soyez. Vous avez et êtes un soutien de tous les jours. Et n'oubliez pas les 3 principes...

A mon groupe d'équine de 5^{ème} année, même si le Covid-19 et la Rhinopneumonie en ont décidé autrement, j'ai passé une super demi année à vos côtés, faite de moments de rire, de désinfection de la PRI, de partage (de surcottes) qui j'espère continueront par la suite et que nous continuerons de nous transmettre nos VDM d'expérience en clinique.

A mon groupe d'interne, Mégane, Louise, Chloé, Charles, Vincent, Jamal pour votre aide de tous les jours en clinique. A tous ces moments passés et à venir, à ces gardes endiablées, (même si fort heureusement je n'appartiens pas encore au combat gagnant de l'accumulation des urgences de nuit et des euthanasies), à ces nuits blanches (puisque le sommeil est surfait au-delà de 4h a dit un grand sage), à ces moments interminables en post-prandial de Journal Club montrant aux yeux de tous un besoin urgent d'apprendre l'anglais, à ces présentations du vendredi préparées le jeudi soir à 22h et tout ce qu'il nous reste à vivre durant cet internat, encore merci !

A mon groupe de poulotage, pour ces 4 intégrations incroyables. Ce sont un nombre de soirées incalculables, des moments inoubliables et une joie immense d'avoir intégré plein de petits nouveaux vétos à vos côtés. Je ne citerai pas tous les noms car vous êtes nombreux mais où que vous soyez à présent je pense fort à vous et espère vous revoir régulièrement par la suite !

A Cindy, Anaïs, Manon, à nos années de lycée à Janson de Sailly, à toutes ces heures de chinois et mathématiques en chinois passées avec vous. J'ai passé de fabuleuses années de lycée grâce à vous. Je vous revois trop peu à mon goût mais pense fort à vous. J'espère que mes petits séjours parisiens me permettront de croiser encore longtemps votre route.

A Laura, ma grande amie des classes préparatoires à Janson de Sailly pour ces trois longues années de prépa avec toi. Tellement de fous rires pendant ces moments si durs. Des khôlles à n'en plus finir, les DS du samedi matin mais surtout ces fameux TIPE sur l'aquaponie... des instants lointains déjà et pourtant encore présents. J'espère que tu as trouver ta voie et que nous pourrons nous revoir très prochainement !!

A Delphine, partie bien trop tôt, un petit mot pour te dire que je pense à toi chaque jour. Merci pour ces deux belles années à l'école véto, à ces soirées entre filles, à ces soirées à l'école, à toutes ces petites confidences. Veilles sur nous de là-haut, nous pensons fort à toi d'en bas.

A mes coachs d'équitation, qui furent nombreux depuis ces 14 années d'équitation. Merci pour la transmission de leur savoir, de leur passion, de leur patience. Sans le savoir forcément, vous avez été une motivation à la poursuite de mes études.

A mes chevaux, également nombreux, qui m'ont appris et m'apprennent chaque jour à aller toujours plus loin, vers toujours plus d'effort sur soi-même. Vous êtes mes meilleurs professeurs dans cette vie. Vous m'avez appris que pour réussir, il est nécessaire de travailler d'arrache-pied pour atteindre le but voulu mais sans jamais oublier le plaisir dans tout ce que l'on fait. Vous êtes mon soutien du quotidien, ma motivation de tous les jours.

A mes autres animaux, également nombreux, de m'apporter beaucoup de joie et de bonheur chaque jour. Une profonde pensée à mon Athos qui me veille de là-haut. Tu as également été, une motivation considérable et un soutien tous les soirs de révision en prépa en me donnant l'envie de continuer.

Aux autres chevaux, dont j'ai pu croiser la route en ce début de carrière. Vous aussi avez été ma source de motivation, me poussant à y croire, à ne renoncer qu'à la fin. Vous m'avez prouvé que les miracles sont possibles et qu'on ne condamne jamais une vie trop tôt. Tant qu'il y a de la vie, tout est encore possible. Cette une leçon de vie dont j'espère me souvenir tout au long de ma carrière.

A tous mes amis, que je n'ai pas cités mais qui ont été de près ou de loin dans ma vie, dans mes études.

Je vous remercie d'avoir été là pour me soutenir, ce diplôme n'aurait pas existé si vous n'aviez pas été présents.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	13
TABLE DES ABREVIATIONS ET SIGLES.....	19
INTRODUCTION.....	21
PREMIÈRE PARTIE :.....	23
LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA LOCOMOTION CHEZ LE CHEVAL	23
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	23
I - ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA LOCOMOTION PAR UN OPÉRATEUR.....	25
A. DÉROULEMENT DE L'EXAMEN LOCOMOTEUR EN MAIN.....	25
1) Examen du cheval en ligne droite	26
2) Examen du cheval sur le cercle	26
3) Localisation du membre boiteux et flexions.....	27
4) Gradation de l'intensité de la boiterie	27
5) Évaluation du membre boiteux en cas de boiterie simple.....	29
i) Boiterie d'un membre antérieur.....	29
ii) Boiterie d'un membre postérieur.....	29
6) Cas des boiteries compensatoires.....	30
7) Localisation de la pathologie par anesthésies étagées.....	30
B. DÉROULEMENT DE L'EXAMEN LOCOMOTEUR EN PISTE.....	31
II - INTÉRÊT DE LA MÉTHODE OBJECTIVE DANS LA DÉTECTION DE BOITERIES.....	34
1) <i>Examen locomoteur sur le terrain</i>	34
2) <i>Suivis des patients à long terme</i>	34
a) Suivi de l'évolution d'une pathologie au cours du temps.....	34
b) Validation des effets d'un médicament ou d'une anesthésie.....	35
c) Consensus vétérinaires et comparaison de cas.....	35
3) <i>Point d'appui d'une visite d'achat</i>	35
4) <i>Prévisions des aptitudes ou des causes de non-performance</i>	35
5) <i>Apport de la méthode objective à l'apprentissage du vétérinaire</i>	36
III - PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION.....	37
A. APPROCHE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION EN LABORATOIRE.....	37
1) Principe d'évaluation objective de la locomotion	37
2) Analyse cinématique du mouvement	38
a) Principe des systèmes d'analyse cinématique	38
i) Marqueurs.....	38
ii) Conditions de réalisation des tests cinématiques.....	39
iii) Enregistrement et transformation des données cinématiques.....	42
b) Diversité des méthodes d'analyse cinématique.....	45
i) Systèmes photographiques.....	45
ii) Électrogoniométrie	46
iii) Systèmes électromagnétiques.....	47
iv) Systèmes d'ultrasons	47
c) Analyse de la symétrie du mouvement et évaluation des boiteries.....	48
i) Analyse de Fourier et étude de la symétrie globale du mouvement.....	48
ii) Identification d'une boiterie par l'analyse de Fourier.....	51
d) Conclusion	54
3) Analyse cinétique du mouvement.....	54
a) Analyse des forces de réaction au sol.....	55
i) Plateforme de force.....	55
ii) Fers instrumentés.....	58
iii) Tapis roulants instrumentés.....	59
b) Électromyographie.....	60

B. APPROCHE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION SUR LE TERRAIN ET PRÉSENTATION DE L'EQUINE LAMENESS LOCATOR®

.....	62
1) Cahier des charges d'une évaluation objective de la locomotion sur le terrain	62
2) Analyse de données accélérométriques.....	62
3) Comparaison des méthodes d'analyse cinématique et accélérométrique du mouvement	66
4) L'Équine Lameness Locator® : une méthode d'accélérométrie par capteurs inertiels.....	68
a) Principe de fonctionnement du Lameness Locator®	68
b) Équipement composant le dispositif.....	68
i) Les capteurs	68
ii) La console d'acquisition	71
b) Paramètres enregistrés par le Lameness Locator®	72
i) Vitesse angulaire du membre antérieur droit	72
ii) Mouvements verticaux de la tête	72
iii) Mouvements verticaux du bassin.....	72
c) Modélisation des données par le Lameness Locator®	73
i) Modélisation graphique des mouvements d'antérieurs	73
i') Évaluation d'une boiterie antérieure	73
ii') Calcul de la norme de variation chez le cheval sain.....	78
iii') Diagramme de rayonnement des antérieurs	80
ii) Modélisation graphique des mouvements des postérieurs	83
i') Évaluation d'une boiterie postérieure.....	83
ii') Calcul de la norme de variation chez le cheval sain.....	86
iii') Diagramme de rayonnement des postérieurs	88
e) Le cas particulier des boiteries compensatoires.....	90
f) Résultats et interprétation des données du Lameness Locator	91
g) Autres méthodes d'accélérométrie : CMI et GPS	91
h) Conclusion	92
DEUXIÈME PARTIE :	95
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	95
COMPARAISON ENTRE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA LOCOMOTION ET LES DONNÉES OBJECTIVES FOURNIES PAR LE LAMENESS LOCATOR® EN MAIN PUIS AU COURS D'UN TEST D'EFFORT STANDARDISÉ SUR PISTE CHEZ DES TROTTEURS ATTELÉS	95
I – INTRODUCTION	95
1) Objectif de l'étude expérimentale.....	95
2) Partenaires de l'étude expérimentale.....	96
II - MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	97
A. MATÉRIEL	97
1) Chevaux testés	97
a) Critères d'inclusion	97
b) Chevaux sélectionnés	97
2) Conditions de réalisation des tests	98
3) Contexte des tests en main et attelés	98
3) Accéléromètres.....	98
4) Caméra	99
B. MÉTHODE ET ENREGISTREMENT DES DONNÉES	99
1) Évaluation de la locomotion en main	99
a) Par l'opérateur	99
b) Par le Lameness Locator	99
2) Évaluation de la locomotion à la piste	100
a) Par l'opérateur	100
b) Par le Lameness Locator	100
C. TRAITEMENT DES DONNÉES	100
1) Traitement des données subjectives de la locomotion	100
2) Traitement des données objectives du Lameness Locator	101
3) Notion d'erreurs et confrontation des données objectives et subjectives	102
a) Définition de la notion d'erreur dans l'analyse subjective	102
i) Absence d'erreur	102
ii) Défaut de signalement ou « erreur de compensation »	102
iii) Erreur modérée	103

iv) Erreur majeure	104
b) Analyse statistique des erreurs commises par le vétérinaire	105
c) Analyse de la corrélation entre le grade de boiterie et les valeurs du Lameness Locator	105
4) Analyse statistique de l'effet corde	106
III – RESULTATS	108
A. Résultats de l'analyse subjective de la locomotion	108
1) Évaluation du membre boiteux et gradation de la boiterie	108
2) Influence de la vitesse dans la gradation de la boiterie	109
3) Influence des pistes	110
4) Répétabilité des mesures	111
B. Résultats de l'analyse objective de la locomotion	111
1) Détermination d'un seuil de détection de boiterie sur la machine	111
a) Calcul du seuil pour les membres antérieurs.....	111
b) Calcul du seuil pour les membres postérieurs.....	113
c) Méthode du « Gold Standard »	114
d) Choix des seuils antérieurs en fonction de la vitesse	115
i) Seuil pour l'antérieur gauche	115
ii) Seuil pour l'antérieur droit	117
e) Choix des seuils postérieurs en fonction de la vitesse.....	119
i) Seuils pour le postérieur gauche.....	119
ii) Seuil pour le postérieur droit.....	121
f) Bilan sur le choix des seuils du Lameness Locator.....	123
2) Dispersion des valeurs de la machine	123
a) Dispersion de H DIFF MAX, H DIFF MIN, P DIFF MAX, P DIFF MIN	123
b) Dispersion des valeurs de la machine en fonction des paliers de vitesses.....	126
3) Influence de la vitesse sur le type de boiterie (impact ou poussée)	130
4) Influence des pistes sur l'évolution du type de boiterie	134
C. Confrontation des données des analyses subjectives et objectives	137
1) Confrontation des évaluations subjectives et des données objectives	137
a) Évaluation des types d'erreurs commises par l'opérateur	137
i) En fonction des paliers de vitesses	137
ii) En fonction des entraîneurs	139
iii) En fonction des seuils de la machine.....	144
b) Progression de l'observateur au cours des essais	145
c) Corrélation entre le grade de boiterie annoncé par le vétérinaire et les valeurs de la machine.....	148
D. Impact du côté d'évaluation des chevaux à la piste	151
1) Évaluation de la symétrie des chevaux en fonction du tournant droit ou gauche	151
2) Impact de la vitesse et du tournant sur la locomotion	153
3) Impact du côté d'évaluation par le vétérinaire	156
TROISIÈME PARTIE :	164
DISCUSSION	164
I- ANALYSE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	164
1) Choix des chevaux sélectionnés et des pistes d'entraînement	164
2) Choix du matériel utilisé	165
3) Choix des méthodes de réalisation des tests et des enregistrements	166
II- ANALYSE DES RESULTATS	167
1) Adaptation d'un système d'accélérométrie à l'examen locomoteur en piste	167
2) Particularités des évaluations de trotteurs à grande vitesse	167
3) Étude de dispersion des valeurs du Lameness Locator et lien avec les erreurs commises lors de l'évaluation des chevaux à grande vitesse	168
4) Effet corde	170
CONCLUSION	173

TABLE DES ILLUSTRATIONS

ILLUSTRATIONS :

FIGURE 1 : EMBLACEMENT DES MARQUEURS COMMUNEMENT UTILISES DANS LES ANALYSES CINEMATIQUES (BACK AND CLAYTON 2013)	39
FIGURE 2 : A : TEST CINEMATIQUE REALISE SUR UN CHEVAL EVOLUANT SUR UN TAPIS ROULANT (ROBERT 2003)	40
FIGURE 3 : B : ENSEMBLE DU DISPOSITIF D'ENREGISTREMENT DES DONNEES CINEMATIQUES ET EMBLACEMENT DES CAMERAS DANS LE CADRE D'UNE ANALYSE TRIDIMENSIONNELLE (ROBERT 2003)	40
FIGURE 4 : REPRESENTATION DES DONNEES COLLECTEES ET ENREGISTREES PAR LE LOGICIEL CINEMATIQUE A PARTIR DE LA LOCALISATION DES MARQUEURS DANS L'ESPACE (BACK AND CLAYTON 2001).....	42
FIGURE 5 : PREMIERS ENREGISTREMENTS D'ANALYSE DE LA LOCOMOTION PAR PHOTOGRAPHIE SUR CHEVAL AU GALOP (A) ET LORS D'UN SAUT (B). (MUYBRIDGE 1878).....	45
FIGURE 6 : ELECTROGONIOMETRE PLACE SUR L'ARTICULATION METACARPO-PHALANGIENNE DU CHEVAL (BACK AND CLAYTON 2001)	46
FIGURE 7 : A : ZEBRIS CMS-HS : MODELE DE FIXATION DES MICROPHONES ULTRASONORES SUR LES PARTIES DISTALES DU MEMBRE DU CHEVAL.	48
FIGURE 8 : B : POSITION DES EMBLATEURS ULTRASONORES PAR RAPPORT AU CHEVAL DE SORTE A CREER LA TRIANGULATION ULTRASONORE. (BACK AND CLAYTON 2001).....	48
FIGURE 9 : A ET B : ANALYSE DES HARMONIQUES SUR UNE FOULEE DE TROT CHEZ UN CHEVAL SAIN PUIS UN CHEVAL BOITEUX. (: DEPLACEMENT VERTICAL EXPERIMENTAL ; \times : A_0 VALEUR MOYENNE DE DEPLACEMENT ; $_$: PREMIERE HARMONIQUE ; $---$: DEUXIEME HARMONIQUE ; : DEPLACEMENT APRES COMBINAISON DE A_0 ET DES DEUX HARMONIQUES.) (AUDIGIE 2002).....	50
FIGURE 10 : RELATIONS ENTRE LA VALEUR DE $\Delta\Phi$ ET LE TYPE DE BOITERIE PRESENTEE PAR LE CHEVAL (AUDIGIE 2002).....	52
FIGURE 11 : ALGORITHME MIS AU POINT POUR IDENTIFIER LE DEGRE DE BOITERIE, LE MEMBRE BOITEUX ET CARACTERISER LA BOITERIE. (AUDIGIE 2002).....	53
FIGURE 12 : REPRESENTATION DES COMPOSANTES DE LA FORCE DE REACTION AU SOL (GROUND REACTION FORCE).....	55
FIGURE 13 : MODELISATION D'UNE JAUGE DE CONTRAINTE (HERTOGH 2013)	56
FIGURE 14 : A : CAPTEUR PIEZOELECTRIQUE ; B : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN CAPTEUR DE FORCE (HACKERT ET HERBAIN 2015).....	57
FIGURE 15 : MODELISATION D'UNE PLATEFORME DE FORCE (HERTOGH 2013) A : PLATEAU ANTIDERAPANT, B : CADRE, C : POSITIONNEMENT DES CAPTEURS.....	57
FIGURE 16 : DISPOSITION DES CAPTEURS DE FORCE INTEGRES AU FER INSTRUMENTE ; B : DISPOSITION DES FERS INSTRUMENTES ET DES BRANCHEMENTS DE CAPTEURS SUR LE PIED DU CHEVAL. (BACK AND CLAYTON 2001)	59
FIGURE 17 : ÉLECTROMYOGRAMME DES CHEFS LONG ET LATERAL DU TRICEPS BRACHIAL ET EVOLUTION DES ANGLES ARTICULAIRES DES ARTICULATIONS DE L'ÉPAULE ET DU COUDE AU COURS D'UNE FOULEE (ROBERT 2003).....	61
FIGURE 18 : EMBLACEMENT DES ACCELEROMETRES DU SYSTEME EQUIMETRIX COUPLE A UN ACCELEROMETRE PLACE SUR LE SACRUM (BARREY 1999)	63
FIGURE 19 : POSITIONNEMENT DES ACCELEROMETRES SUR LES PARTIES DISTALES DU PIED DU CHEVAL (LANOVA 1998).....	64

FIGURE 20 : SIGNAUX OBTENUS PAR LES QUATRE ACCELEROMETRES PRECEDEMMENT DECRITS : A : ACCELEROMETRE DE LA PARTIE DISTALE DU SABOT, B : ACCELEROMETRE DE LA PARTIE PROXIMALE DU SABOT, C : ACCELEROMETRE DE LA 2EME PHALANGE, D : ACCELEROMETRE DE LA 1ERE PHALANGE (LANOVA 1998).....	64
FIGURE 21 : COMPARAISON DES DONNEES OBTENUES ENTRE LES METHODES CINEMATIQUE ET ACCELEROMETRIQUE. (LELEU 2002)	67
FIGURE 22 : MISE EN PLACE DU CAPTEUR DE TETE (CHVE LIVET).....	69
FIGURE 23 : MISE EN PLACE DU CAPTEUR DE L'ANTERIEUR DROIT (CHVE LIVET)	70
FIGURE 24 : MISE EN PLACE DU CAPTEUR DE GROUPE POUR DES EVALUATIONS EN MAIN (CHVE LIVET)	70
FIGURE 25 : MISE EN PLACE DU CAPTEUR DE GROUPE POUR DES EVALUATIONS ATTELEES (CHVE LIVET).....	71
FIGURE 26 : CONSOLE D'ACQUISITION DU LAMENESS LOCATOR (CHVE LIVET)	71
FIGURE 27 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES DEUX HARMONIQUES ET DE LEUR SOMME, OBTENUES PAR DECOMPOSITION DES MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA TETE ET DU BASSIN. MAX 1 REPRESENT LA POSITION MAXIMALE DE LA TETE (OU DU BASSIN) AU DEBUT DE LA PHASE D'APPUI DU PIED AU SOL ; MAX 2 REPRESENT LA POSITION MAXIMALE DE LA TETE (OU DU BASSIN) LORS DE LA FIN DE LA PHASE D'APPUI ; MIN 1 REPRESENT LA POSITION MINIMALE DE LA TETE LORS DE LA PHASE D'APPUI ; MIN 2 REPRESENT LA POSITION MINIMALE DE LA TETE LORS DE LA PHASE DE PROJECTION. LES BARRES NOIRES CORRESPONDENT A LA DUREE D'APPUI DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT AU SOL. (KEEGAN ET AL. 2011)	74
FIGURE 28 : MESURES D'ACCELERATION DES MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA TETE ET DE LA VITESSE ANGULAIRE DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT LORS DU DEPLACEMENT (KEEGAN 2004).....	75
FIGURE 29 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA TETE ET DES VITESSES ANGULAIRES DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT APRES TRANSFORMATION DES DONNEES BRUTES DU LAMENESS LOCATOR. (KEEGAN 2004)	75
FIGURE 30 : PRINCIPE SCHEMATIQUE DU CALCUL DES VALEURS DE HEAD DIFF MAX ET HEAD DIFF MIN (KAMUS 2013).....	77
FIGURE 31 : DEPLACEMENT VERTICAL DE LA TETE CHEZ UN CHEVAL SAIN (CAURE 2017).....	77
FIGURE 32 : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES MEMBRES ANTERIEURS : A GAUCHE LE CHEVAL EST SAIN DE ES MEMBRES ANTERIEURS ; A DROITE, LE CHEVAL EST BOITEUX DE SON MEMBRE ANTERIEUR DROIT. (ENREGISTREMENTS DU CHVE DE LIVET).....	79
FIGURE 33 : DEPLACEMENT VERTICAL DE LA TETE DANS LE CAS D'UNE BOITERIE D'IMPACT DE L'ANTERIEUR DROIT (A DROITE) ET D'UNE BOITERIE DE POUSSEE DE L'ANTERIEUR DROIT (A GAUCHE).....	80
FIGURE 34 : REPRESENTATION DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES MEMBRES ANTERIEURS	81
FIGURE 35 : <i>DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES ANTERIEURS CORRESPONDANT A : A. UNE BOITERIE DE POUSSEE DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT, B. UNE BOITERIE D'IMPACT DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT, C. UNE BOITERIE D'IMPACT DU MEMBRE ANTERIEUR GAUCHE, D. UNE BOITERIE DE POUSSEE DU MEMBRE ANTERIEUR GAUCHE, E. UNE BOITERIE DE MILIEU D'APPUI DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT, F. UNE BOITERIE DE MILIEU D'APPUI DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT. (ENREGISTREMENTS DU CHVE DE LIVET)</i>	83
FIGURE 36 : MESURES D'ACCELERATION DES MOUVEMENTS VERTICAUX DU BASSIN ET DE LA VITESSE ANGULAIRE DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT LORS DU DEPLACEMENT. (KEEGAN 2004).....	84
FIGURE 37 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES MOUVEMENTS VERTICAUX DU BASSIN ET DES VITESSES ANGULAIRES DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT APRES TRANSFORMATION DES DONNEES BRUTES DU LAMENESS LOCATOR. (KEEGAN 2004)	85
FIGURE 38 : PRINCIPE SCHEMATIQUE DU CALCUL DES VALEURS DE PELVIS DIFF MAX ET PELVIS DIFF MIN (KAMUS 2013).....	86
FIGURE 39 : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES MEMBRES POSTERIEURS SUR UN CHEVAL PRESENTANT UNE BOITERIE D'IMPACT ET DE POUSSEE DU MEMBRE POSTERIEUR GAUCHE. (ENREGISTREMENTS DU CHVE DE LIVET)	87

FIGURE 40 : DEPLACEMENT VERTICAL DE LA TETE DANS LE CAS D'UNE BOITERIE D'IMPACT DU POSTERIEUR DROIT (A DROITE) ET D'UNE BOITERIE DE PUSSEE DU POSTERIEUR DROIT (A GAUCHE)	88
FIGURE 41 : REPRESENTATION DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES MEMBRES ANTERIEURS	89
FIGURE 42 : : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES MEMBRES POSTERIEURS CORRESPONDANT A : A. UNE BOITERIE DE PUSSEE DU MEMBRE POSTERIEUR GAUCHE ET UNE BOITERIE D'IMPACT DU MEMBRE POSTERIEUR DROIT ; B. UNE BOITERIE DE PUSSEE ET D'IMPACT DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT. (ENREGISTREMENT DU CHVE DE LIVET	89
FIGURE 43 : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT CORRESPONDANT A UNE BOITERIE PRIMAIRE DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT ET DES BOITERIES SECONDAIRES DES MEMBRES POSTERIEURS IPSILATERAL ET CONTROLATERAL. (ENREGISTREMENTS DU CHVE DE LIVET)	90
FIGURE 44 : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT CORRESPONDANT A UNE BOITERIE PRIMAIRE DU MEMBRE POSTERIEUR GAUCHE ET UNE BOITERIE SECONDAIRE DU MEMBRE ANTERIEUR DROIT. (ENREGISTREMENTS DU CHVE DE LIVET).....	91
FIGURE 45 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA REPARTITION DES GRADES DE BOITERIES PAR MEMBRE	108
FIGURE 46 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DU SEUIL DU LAMENESS LOCATOR.....	112
FIGURE 47 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS DROITS NON BOITEUX EN FONCTION DU SEUIL DU LAMENESS LOCATOR.....	112
FIGURE 48 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DU SEUIL DU LAMENESS LOCATOR.....	113
FIGURE 49 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS DROITS NON BOITEUX EN FONCTION DU SEUIL DU LAMENESS LOCATOR.....	114
FIGURE 50 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	115
FIGURE 51 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES COURBES DE TENDANCE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	116
FIGURE 52 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS DROITS NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	117
FIGURE 53 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES COURBES DE TENDANCE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	118
FIGURE 54 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	119
FIGURE 55 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES COURBES DE TENDANCE DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	120
FIGURE 56 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS DROITS NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	121
FIGURE 57 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS GAUCHES NON BOITEUX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	122
FIGURE 58 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISPERSION DES VALEURS H DIFF MAX, H DIFF MIN, P DIFF MAX ET P DIFF MIN	124
FIGURE 59 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISPERSION DES VALEURS H DIFF MAX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	127
FIGURE 60 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISPERSION DES VALEURS H DIFF MIN EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	127
FIGURE 61 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISPERSION DES VALEURS P DIFF MAX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	129

FIGURE 62 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISPERSION DES VALEURS P DIFF MAX EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	130
FIGURE 63 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES TYPES DE BOITERIES ANTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	131
FIGURE 64 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES TYPES DE BOITERIES POSTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	133
FIGURE 65 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES TYPES DE BOITERIES ANTERIEURES EN FONCTION DES ENTRAINEURS.....	134
FIGURE 66 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES TYPES DE BOITERIES POSTERIEURES EN FONCTION DES ENTRAINEURS.....	135
FIGURE 67 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR LES MEMBRES ANTERIEURS EN FONCTION DES ENTRAINEURS.....	140
FIGURE 68 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR LES MEMBRES POSTERIEURS EN FONCTION DES ENTRAINEURS	141
FIGURE 69 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR LES MEMBRES POSTERIEURS EN FONCTION DES ENTRAINEURS	143
FIGURE 70 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR LES MEMBRES ANTERIEURS EN FONCTION DES DATES D'EVALUATION	146
FIGURE 71 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR LES MEMBRES POSTERIEURS EN FONCTION DES DATES D'EVALUATION	147
FIGURE 72 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS DE SYMETRIE COMMISES PAR LE VETERINAIRE EN FONCTION DES DATES D'EVALUATION	148
FIGURE 73 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA REPARTITION DES VALEURS DE H DIFF MIN EN FONCTION DU GRADE DE BOITERIE ANNONCE PAR LE VETERINAIRE ET RELATION LINEAIRE	149
FIGURE 74 : REPRESENTATION GRAPHIQUE SOUS FORME DE LA REPARTITION DES VALEURS DE H DIFF MIN EN FONCTION DU GRADE DE BOITERIE ANNONCE PAR LE VETERINAIRE.....	149
FIGURE 75 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES BOITERIES ANTERIEURES EN FONCTION DE LA MAIN A LAQUELLE LES CHEVAUX EVOLUENT	152
FIGURE 76 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS MAJEURES ANTERIEURES EN FONCTION DE LA POSITION DU VETERINAIRE PAR RAPPORT AU CHEVAL LORS DE L'EVALUATION	160
FIGURE 77 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ERREURS MAJEURES POSTERIEURES EN FONCTION DE LA POSITION DU VETERINAIRE PAR RAPPORT AU CHEVAL LORS DE L'EVALUATION	160
FIGURE 78 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA REPARTITION DES ERREURS SUR LES MEMBRES ANTERIEURS ET POSTERIEURS EN FONCTION DE LA POSITION DU VETERINAIRE PAR RAPPORT AU CHEVAL LORS DE L'EVALUATION.....	161
FIGURE 79 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA SYMETRIE DES ERREURS EN FONCTION DE LA POSITION DU VETERINAIRE PAR RAPPORT AU CHEVAL LORS DE L'EVALUATION	161

TABLEAUX :

TABLEAU 1 : PARTICIPATION DES CHEVAUX AUX TESTS EN FONCTION DES DATES D'EVALUATIONS ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.	
TABLEAU 2 : REPARTITION DES POURCENTAGES DE MEMBRES BOITEUX PAR GRADE DE BOITERIE EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSE.....	109
TABLEAU 3 : REPARTITION DES POURCENTAGES DE MEMBRES BOITEUX PAR GRADE DE BOITERIE EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSE EN DISTINGUANT LES DEUX ENTRAINEURS	110

TABLEAU 4 : REPARTITION DES POURCENTAGES DE MEMBRES BOITEUX PAR GRADE DE BOITERIE EN FONCTION DES DATES D'ÉVALUATION	111
TABLEAU 5 : REPARTITION DES POURCENTAGES DE MEMBRES NON BOITEUX AVEC UN SEUIL DE 6/3MM	111
TABLEAU 6 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR	112
TABLEAU 7 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR	113
TABLEAU 8 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR ET DES PALIERS DE VITESSE	115
TABLEAU 9 : ÉQUATIONS LINEAIRES ET CALCUL DES SEUILS A PARTIR D'UN GOLD STANDARD DE 72% DE MEMBRES NON BOITEUX	116
TABLEAU 10 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES ANTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR ET DES PALIERS DE VITESSE	117
TABLEAU 11 : ÉQUATIONS LINEAIRES ET CALCUL DES SEUILS A PARTIR D'UN GOLD STANDARD DE 72% DE MEMBRES NON BOITEUX	118
TABLEAU 12 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR ET DES PALIERS DE VITESSE	119
TABLEAU 13 : ÉQUATIONS LINEAIRES ET CALCUL DES SEUILS A PARTIR D'UN GOLD STANDARD DE 72% DE MEMBRES NON BOITEUX	120
TABLEAU 14 : ÉVOLUTION DES POURCENTAGES DE MEMBRES POSTERIEURS NON BOITEUX EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR ET DES PALIERS DE VITESSE	121
TABLEAU 15 : ÉQUATIONS LINEAIRES ET CALCUL DES SEUILS A PARTIR D'UN GOLD STANDARD DE 72% DE MEMBRES NON BOITEUX	122
TABLEAU 16 : REPARTITION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR A PARTIR D'UN GOLD STANDARD DE 72% DE MEMBRES NON BOITEUX	123
TABLEAU 17 : RESULTATS DES ETUDES DE DISPERSION DE H DIFF MAX, H DIFF MIN, P DIFF MAX ET P DIFF MIN REALISEES SUR L'ENSEMBLE DES EVALUATIONS	124
TABLEAU 18 : RESULTATS DES ETUDES DE DISPERSION DE H DIFF MAX ET H DIFF MIN EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	126
TABLEAU 19 : RESULTATS DES ETUDES DE DISPERSION DE P DIFF MAX ET P DIFF MIN EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	128
TABLEAU 20 : REPARTITION DES TYPES DE BOITERIES ANTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	131
TABLEAU 21 : REPARTITION DES TYPES DE BOITERIES POSTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES ...	132
TABLEAU 22 : REPARTITION DES TYPES DE BOITERIES ANTERIEURES ATTELE EN FONCTION DES ENTRAINEURS ...	134
TABLEAU 23 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	137
TABLEAU 24 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS POSTERIEURES EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	138
TABLEAU 25 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES ET DE LA SYMETRIE DES ERREURS EN FONCTION DES PALIERS DE VITESSES	138
TABLEAU 26 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES EN FONCTION DES ENTRAINEURS	139
TABLEAU 27 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS POSTERIEURES EN FONCTION DES ENTRAINEURS	140
TABLEAU 28 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES ET DE LA SYMETRIE DES ERREURS EN FONCTION DES ENTRAINEURS	142
TABLEAU 29 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR	144
TABLEAU 30 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS POSTERIEURES EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR	144

TABLEAU 31 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES ET DE LA SYMETRIE DES ERREURS EN FONCTION DES SEUILS DU LAMENESS LOCATOR	145
TABLEAU 32 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES EN FONCTION DES DATES D'EVALUATIONS ...	146
TABLEAU 33 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS POSTERIEURES EN FONCTION DES DATES D'EVALUATIONS ..	147
TABLEAU 34 : REPARTITION DES TYPES D'ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES ET DE LA SYMETRIE DES ERREURS EN FONCTION DES DATES D'EVALUATIONS	147
TABLEAU 35 : RESULTATS DE LA CORRELATION ENTRE LE GRADE DE BOITERIE ANTERIEUR INDIQUE PAR LE VETERINAIRE ET LES VALEURS DE H DIFF MIN	149
TABLEAU 36 : RESULTATS DE LA CORRELATION ENTRE LE GRADE DE BOITERIE POSTERIEURE INDIQUE PAR LE VETERINAIRE ET LES VALEURS ABSOLUE DE LA SOMME DES P DIFF MIN ET P DIFF MAX	150
TABLEAU 37 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES EVALUATIONS	151
TABLEAU 38 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EVALUES A MAIN GAUCHE CHEZ L'ENTRAINEUR 2	152
TABLEAU 39 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EVALUES A MAIN DROITE CHEZ L'ENTRAINEUR 1 ET L'ENTRAINEUR 2.....	152
TABLEAU 40 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX AUX DIFFERENTS PALIERS DE VITESSE.....	153
TABLEAU 41 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN DROITE CHEZ L'ENTRAINEUR 1 AUX DIFFERENTS PALIERS DE VITESSE	154
TABLEAU 42 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN DROITE CHEZ L'ENTRAINEUR 2 AUX DIFFERENTS PALIERS DE VITESSE	155
TABLEAU 43 : REPARTITION DES BOITERIES PAR MEMBRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN GAUCHE CHEZ L'ENTRAINEUR 2 AUX DIFFERENTS PALIERS DE VITESSE	155
TABLEAU 44 : REPARTITION DES ERREURS ANTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EN FONCTION DU COTE OU LE VETERINAIRE EVALUE LES CHEVAUX	156
TABLEAU 45 : REPARTITION DES ERREURS POSTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EN FONCTION DU COTE OU LE VETERINAIRE EVALUE LES CHEVAUX	157
TABLEAU 46 : REPARTITION DES ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE ET DE LA SYMETRIE DES ERREURS SUR L'ENSEMBLE DES CHEVAUX EN FONCTION DU COTE OU LE VETERINAIRE EVALUE LES CHEVAUX.....	157
TABLEAU 47 : REPARTITION DES ERREURS ANTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE EN FONCTION DES ENTRAINEURS SUR DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN DROITE AVEC UN TOURNANT A DROITE	158
TABLEAU 48 : REPARTITION DES ERREURS POSTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE EN FONCTION DES ENTRAINEURS SUR DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN DROITE AVEC UN TOURNANT A DROITE	158
TABLEAU 49 : REPARTITION DES ERREURS ANTERIEURES ET POSTERIEURES COMMISES PAR LE VETERINAIRE EN FONCTION DES ENTRAINEURS SUR DES CHEVAUX EVOLUANT A MAIN DROITE AVEC UN TOURNANT A DROITE	159

TABLE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

AAEP : American Association of Equine Practitioners
AG : antérieur gauche
AD : antérieur droit
PG : postérieur gauche
PD : postérieur droit
GRF : Ground Reaction Force
SYM : symétrie
REG : régularité
Foulée DU : Durée de la foulée standardisée
Appui DU : Durée de la phase d'appui standardisée
Propulsion DU : Durée de la phase de propulsion standardisée
VDU : Vitesse standardisée
IDU : Impulsion standardisée
CMI : Centrale de Mesure Inertielle
H diff max : différence de hauteur maximale de tête
H diff min : différence de hauteur minimale de tête
P diff max : différence de hauteur maximale de bassin
P diff min : différence de hauteur minimale de bassin
M : En main
E : Échauffement
P1 : Palier de vitesse 1
P2 : Palier de vitesse 2
P3 : Palier de vitesse 3
ANT : antérieur
POST : postérieur
J0 : Jour 0
J30 : Jour 30
J60 : Jour 60
Q1 : Quartile 1
Q3 : Quartile 3
Q1 – Q3 : Différence du quartile 1 et 3
COMP : Erreur compensée
MOD : Erreur modérée
MAJ A : Erreur majeure A
MAJ B : Erreur majeure B
MAJ C : Erreur majeure C

INTRODUCTION

En 2016, selon les chiffres de l'IFCE, la filière des courses enregistrait un chiffre de 9954 millions d'euros de produits générés prenant en compte les ventes de chevaux, l'élevage et les paris en course. Cette même année, la France recensait 19 096 trotteurs et 155 110 participations à des courses de trot. Cette filière représente donc un poids économique considérable. Les sélections génétiques, l'amélioration des conditions d'entraînement et les soins apportés sont entièrement dirigés vers une augmentation de la performance des trotteurs en course. Le vétérinaire est un acteur essentiel à la réussite de ces chevaux athlètes en assurant les soins et le suivi de santé.

Les pathologies locomotrices représentent la cause la plus fréquente d'intervention du vétérinaire. Au vu des enjeux économiques, il apparaît nécessaire que le vétérinaire apporte un suivi et un diagnostic précoce dans la détection des boiteries afin de prévenir un arrêt de carrière anticipé pour cause de blessure. Les techniques d'imagerie et d'exams complémentaires ont fait l'objet de nombreuses améliorations et innovations qui permettent à l'heure actuelle un diagnostic lésionnel extrêmement précis. Toutefois, ces exams sont relativement coûteux et nécessitent de localiser avec un maximum de précision le site douloureux.

En ce sens, de nombreux outils de détection quantitative de boiteries ont été développés afin d'apporter une aide diagnostique au vétérinaire lors d'exams orthopédiques. Ces appareils ont ainsi offert de nouvelles connaissances sur les caractéristiques de la locomotion du cheval, jusqu'alors difficile à étudier. L'amélioration de ces techniques a permis de passer d'un matériel encombrant, d'utilisation complexe et peu adapté à un examen orthopédique classique, à un matériel plus innovant, léger et adapté aux conditions de terrain. Les particularités d'entraînement à grande vitesse du trotteur nécessitent de réaliser des exams se rapprochant des conditions d'exercice et de course. Cependant, les exams locomoteurs à grande vitesse sont relativement récents et peu décrits car relativement complexes à mettre en place : ils nécessitent de l'expérience de la part du vétérinaire et un matériel adapté aux conditions de terrain. Le Lameness Locator est l'un de ces derniers outils parfaitement conçus pour une utilisation de routine chez le vétérinaire praticien et adaptables à des exams locomoteurs à grande vitesse.

L'objet de cette étude est de démontrer l'intérêt de l'utilisation d'une méthode objective et quantitative de détection de boiteries avec le Lameness Locator dans le cadre d'un examen orthopédique sur des trotteurs à grande vitesse et de comparer les résultats objectifs avec l'évaluation du vétérinaire. Le trotteur étant peu habitué à un examen locomoteur en main, notre étude s'attache également à comparer les différences entre les données obtenues lorsque les chevaux sont présentés en main ou attelés.

L'exposé débute par une étude bibliographique permettant de comparer les évaluations subjectives et objectives de la locomotion puis de développer les différentes techniques et outils de mesures objectives de la locomotion. La deuxième partie consiste en une présentation des conditions de réalisation des tests sur les trotteurs, menés au cours de l'étude, et un résumé des résultats obtenus. Enfin, une discussion est réalisée afin de comparer les résultats de notre étude avec les données de la littérature.

PREMIÈRE PARTIE :
LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA LOCOMOTION
CHEZ LE CHEVAL
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les premières études de la locomotion du cheval remontent au XVIII^{ème} siècle et intéressaient principalement les écuyers essayant de théoriser l'art et la technique équestre suite aux découvertes de la physique des forces et du centre de gravité. Dupaty de Clam, cavalier de cette époque, a été le premier à introduire le terme « d'équitation mathématique ». Ces considérations ont ensuite été reprises par des vétérinaires dont Vincent et Goiffon, auteurs de « L'étude anatomique du cheval et des mouvements » en 1779 sous forme de planches anatomiques. Vers 1860, Marey mis au point la première méthode objective d'analyse de la locomotion à l'aide d'un sygmographe puis d'un chronophotographe permettant de décomposer le mouvement en un ensemble de séquences. D'autres cavaliers se sont ensuite emparés de ces techniques dont Gossart, auteur de « Les allures du cheval : étude chronophotographique et mathématique » en 1907. Les premières techniques d'étude ont donc reposé sur la méthode cinématique consistant à décrire le mouvement. Plus tard, le développement des connaissances sur les forces physiques régissant le mouvement apporta de nouveaux éléments et le début des méthodes cinétiques.

Les techniques d'accélérométrie, faisant usage de capteurs mobiles placés sur le cheval, que nous utilisons dans le cadre de notre étude, sont bien plus récentes mais leur application révèle un véritable potentiel dans la description des caractéristiques de la locomotion.

Nous développerons dans un premier temps les caractéristiques de l'évaluation subjective de la locomotion du cheval, couramment utilisée lors d'un examen locomoteur classique avant d'examiner les limites de cet examen et l'intérêt d'avoir recours à des méthodes objectives d'évaluation fournissant des données complémentaires intéressantes dans le cadre d'un diagnostic de boiterie. Enfin, nous recenserons et comparerons les différentes techniques objectives décrites depuis la fin du XIX^{ème} siècle.

I - ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA LOCOMOTION PAR UN OPÉRATEUR

A. DÉROULEMENT DE L'EXAMEN LOCOMOTEUR EN MAIN

L'examen locomoteur en main est un examen classiquement utilisé lorsqu'un problème locomoteur est suspecté. Il se doit d'être complet afin de caractériser au mieux la boiterie en définissant la localisation exacte de la douleur et la nature de la lésion. Il permet notamment de reproduire un maximum de mouvements pouvant engendrer une boiterie tout en restant facilement applicable en clinique ou sur le terrain. Cependant, contrairement à un examen locomoteur en piste, il se réalise à petite vitesse et ne permet pas de reproduire certaines affections visibles uniquement à grande vitesse. Dans certains cas, et notamment chez les chevaux travaillant en conditions intensives (chevaux de course ou d'endurance), un examen en conditions réelles d'exercice sera nécessaire pour établir un diagnostic de boiterie ou de contre-performance.

Tout examen locomoteur passe avant tout par un recueil de l'anamnèse et des commémoratifs. L'examen permet d'engager une discussion avec le propriétaire afin de cerner au mieux ses attentes et de connaître l'historique du cheval (âge, alimentation, statut de vaccination et de vermifugation, activité sportive, prochaines échéances etc.) et de sa boiterie (date d'apparition, symptômes, évolution, traitements antérieurs etc.). L'anamnèse permet de cibler les difficultés rencontrées par le propriétaire. Elle permet parfois d'orienter l'examen locomoteur par la réalisation d'exercices adéquats. Le vétérinaire doit cependant rester maître de son diagnostic et ne pas être trop influencé par l'analyse du propriétaire pouvant s'avérer incomplète ou fautive.

Il s'en suit un examen statique au cours duquel le vétérinaire relève des anomalies ou particularités qui pourraient avoir une répercussion sur le fonctionnement biomécanique du cheval en mouvement. L'examen consiste en une inspection de l'ensemble du corps du cheval, une palpation et des pressions des muscles, articulations ou tendons, et une mobilisation des différentes articulations.

Il est ainsi important de noter :

- Des aplombs défectueux, une modification du polygone de sustentation
- Des zones de chaleur ou de gonflement à la palpation, de douleurs aux pressions
- Des manipulations des membres ou du tronc douloureuses
- Des zones d'amyotrophies etc.

Cette première approche donne les premiers éléments en lien avec l'affection locomotrice. Ces éléments seront ainsi à relier avec les observations de l'examen dynamique.

1) Examen du cheval en ligne droite

L'examen du cheval en ligne droite débute tout d'abord par une évaluation de la locomotion au pas par le biais d'un ou de plusieurs allers-retours. Le pas est une allure lente à 4 temps permettant une bonne décomposition du mouvement.

A cette allure, il est déjà possible d'évaluer une raideur de la démarche, une diminution d'une des phases de la foulée, un balancement asymétrique de la tête, une incurvation du corps permettant le soulagement d'un membre ou d'une partie du dos, une descente des boulets asymétrique, un défaut d'engagement d'un ou des deux postérieurs. Dans certains cas, le membre boiteux est identifiable si les signes sont suffisamment marqués.

L'examen se poursuit par des allers-retours au trot selon le même schéma qu'au pas. Le trot est une allure dynamique, sauté et symétrique à 2 temps caractérisée par une phase d'appui d'un bipède diagonal, une phase de soutien puis à nouveau une phase d'appui de l'autre bipède diagonal et d'une phase de soutien. Cette allure est relativement intéressante dans l'examen dynamique puisqu'il s'agit de l'allure par excellence permettant d'identifier le membre boiteux. Il est alors possible de détecter un raccourcissement d'une phase de la foulée, une asymétrie des mouvements de la tête et du bassin, un soulagement d'un membre par rapport à un autre, un défaut de descente des boulets, un défaut d'engagement des postérieurs etc.

Cette première partie de l'examen apporte de nombreuses informations sur la locomotion du cheval présenté et permet généralement d'identifier le membre boiteux dans le cas où la boiterie est assez intense ou accentuée sur sol dur.

2) Examen du cheval sur le cercle

L'examen peut se poursuivre par une évaluation de la locomotion sur des courbes. Il est alors possible de réaliser un huit de chiffre assez serré au pas. Ce test permet notamment de vérifier la bonne coordination entre les différents mouvements du cheval, l'engagement des postérieurs, la souplesse du dos, la descente des boulets etc.

L'examen du cheval sur le cercle constitue une étape clé dans l'établissement du diagnostic précis d'une boiterie. En effet, le cheval est évalué sur différents types de sols (dur puis mou) et en mouvement aux trois allures. Sur le cercle, la boiterie a tendance à être accentuée et est ainsi rendue plus visible pour l'observateur. Cela permet également de reproduire des situations d'entraînement où les boiteries apparaissent en courbe du fait d'un report du poids du cheval sur un membre plus qu'un autre au moment de tourner.

Le travail à la longe induit de lui-même des asymétries parfois absentes sur la ligne droite. Il est alors important de comprendre s'il s'agit d'une vraie boiterie ou d'une asymétrie induite par l'exercice (Rhodin et al. 2015). Physiologiquement, le cheval présente une asymétrie sur le cercle caractérisée par une asymétrie de l'antérieur interne pouvant engendrer une modification de l'amplitude des mouvements de tête. Pour les membres postérieurs, le cheval maintient la hanche de son membre interne au cercle plus haute que la hanche du membre externe (Clayton et al.). Cependant, ces asymétries doivent s'inverser lorsque le cheval est évalué à main opposée.

Au trot, la boiterie est exacerbée lorsque l'antérieur atteint est à l'intérieur du cercle si l'affection touche le boulet ou le pied. Une atteinte du ligament suspenseur du boulet aura au contraire tendance à accentuer la boiterie lorsque le membre se pose à l'extérieur du cercle.

Cela permet également d'examiner le cheval au galop ce qui n'est pas possible en main en ligne droite. A cette allure, on évalue essentiellement la souplesse du dos, l'équilibre du cheval et l'engagement des postérieurs.

3) Localisation du membre boiteux et flexions

Le plus souvent, le vétérinaire choisit de réaliser des flexions des membres soit pour conforter son diagnostic précédent soit pour mieux l'orienter.

En effet, les tests des flexions permettent de mettre sous contrainte les différentes articulations ou de relâcher certains segments des membres du cheval provoquant ainsi une exacerbation de la boiterie lorsque le cheval repart en ligne au trot. L'étude menée par Marshall et al. (2012) avec l'utilisation de capteurs inertiels a mis en évidence une augmentation significative des mouvements du bassin sur les 10 foulées de trot suivant la flexion. Différents types de flexions sont possibles en fonction de la durée de la flexion, de l'intensité de la contrainte ou de s'il s'agit d'une flexion simple d'une articulation ou globale de plusieurs articulations. Une flexion est qualifiée de positive lorsque le cheval repart boiteux du membre mis sous tension et négative lorsque la flexion n'a pas provoqué de dégradation de la locomotion du cheval. Armentrout et al. (2011) ont notamment montré qu'une flexion de 60 secondes a plus de chance d'être positive qu'une flexion de 5 secondes. Cependant, dans 74% des cas étudiés, l'interprétation de la flexion est la même quelle que soit la durée de la flexion.

Pour les membres antérieurs, des flexions simples intéressant les articulations séparément peuvent permettre de trouver le siège de l'affection. Pour les postérieurs, la flexion réalisée est forcément globale à l'ensemble des articulations du membre car l'appareil réciproque du cheval ne permet pas d'effectuer des flexions indépendantes de chaque articulation.

La flexion d'un membre entraîne également un report de poids sur l'autre membre pouvant engendrer une douleur dite d'appui. Le cheval présente alors une boiterie du membre controlatéral à la flexion.

4) Gradation de l'intensité de la boiterie

Il est nécessaire d'établir une gradation de l'intensité de boiterie. L'échelle de gradation doit également être la même entre les différents vétérinaires afin qu'ils puissent s'accorder sur le diagnostic à poser. Elle permet également à un même vétérinaire d'évaluer l'évolution d'une affection lors de suivis.

Nous utilisons dans cette étude l'échelle AAEP (American Association of Equine Practitioners), actuellement la plus utilisée par les vétérinaires. Cette gradation permet une distinction de l'intensité de boiterie grâce à 6 grades :

Tableau 1 : Système de gradation de boiterie AAEP (1991)

Degré	Description
0/5	La boiterie est imperceptible dans toutes les conditions de l'examen
1/5	La boiterie est difficilement observable et apparente de façon variable, quelles que soient les conditions de l'examen
2/5	La boiterie est difficilement observable au pas ou au trot en ligne droite mais significativement apparente sous certaines conditions de l'examen (sur le cercle, sur sol dur, sur plan incliné etc...)
3/5	La boiterie est significativement observable au trot dans toutes les circonstances de l'examen
4/5	La boiterie est évidente au pas
5/5	La boiterie entraîne une suppression d'appui en mouvement et/ou au repos ou une incapacité totale à se déplacer

La grille AAEP est utilisée conventionnellement par un grand nombre de vétérinaires. Il est possible de subdiviser chacun des grades précédents afin d'obtenir un grade de boiterie de 0 à 10. Cette dernière gradation se rapproche des systèmes de gradations anglais à 11 grades développés par Wyn-Jones en 1988 (Keegan et al, 2007). Le grade de boiterie du cheval est indiqué à l'issue de l'ensemble des examens sur les différents sols, en ligne droite ou en cercle et à toutes les allures.

La gradation AAEP modifiée apporte une précision supplémentaire dans la gradation de la boiterie en distinguant les circonstances d'apparition de la boiterie. Elle est décomposée en 6 grades et uniquement sur une évaluation en main en ligne droite au trot.

Tableau 2 : Système de gradation AAEP modifié (Ross et al. 2011)

Degré	Description
0/5	La boiterie est imperceptible dans toutes les conditions de l'examen
1/5	La boiterie est discrète au trot en ligne droite. L'appui du membre boiteux antérieur initie un léger mouvement de tête vers le haut et l'appui du membre boiteux postérieur un léger mouvement de bassin vers le haut. Ces mouvements de tête et bassin ne sont pas systématiques.
2/5	La boiterie est modérée au trot en ligne droite. Les mouvements de tête et de bassin sont marqués.
3/5	Les mouvements de tête et de bassin sont marqués. Un mouvement de tête est observé sur l'appui du membre antérieur diagonal au membre postérieur boiteux
4/5	La boiterie est sévère au trot en ligne droite. Les mouvements de tête et de bassin sont très marqués.
5/5	La boiterie entraîne une suppression d'appui en mouvement et/ou au repos ou une incapacité totale de se déplacer

Parmi ces différentes échelles, le seul grade permettant un consensus est le grade le plus élevé caractérisé par une suppression totale de l'appui.

L'évaluation et le choix de gradation des boiteries restent subjectifs et dépendants du vétérinaire qui les réalise. Keegan et al. (2010) a évalué la répétabilité des évaluations subjectives en comparant les grades de boiterie annoncés par différents vétérinaires expérimentés : après un examen en ligne droite les vétérinaires s'accordent dans 77% des cas et dans 73% des cas suite à un examen orthopédique complet. Lorsque le grade de boiterie est supérieur à 1,5 selon la grille AAEP, les cliniciens obtiennent la même évaluation dans 93% des cas contre 62% lorsque la boiterie est inférieure à ce grade. Ces chiffres montrent donc une assez bonne répétabilité lors de boiteries de grade avancé mais un manque de précision sur des boiteries moins importantes.

5) Évaluation du membre boiteux en cas de boiterie simple

Le diagnostic d'une boiterie débute tout d'abord par la détection du membre boiteux. Plusieurs critères permettent d'orienter l'observation lors de l'examen orthopédique.

i) Boiterie d'un membre antérieur

Au trot, une boiterie d'un membre antérieur est classiquement détectée grâce à des mouvements verticaux de la tête plus accentués que chez un cheval sain. En effet, il est classiquement admis que le cheval relève la tête lors de l'appui de son membre atteint alors qu'il baisse sa tête lorsqu'il prend appui sur son antérieur sain. Par ce processus, il parvient à décharger son poids du membre atteint.

L'étude de Keegan et al. (2013) a permis de montrer que le critère le plus souvent retenu dans la détection d'une boiterie d'antérieur est l'abaissement de la tête lors du posé du membre sain. Au contraire, l'élévation de la tête est faiblement corrélée à l'évaluation subjective.

Il est également possible d'associer ce critère à la descente des boulets : en effet, le boulet est moins étendu et descend moins lorsque le cheval présente une boiterie de cet antérieur, en raison de la réduction du temps d'appui du membre boiteux

ii) Boiterie d'un membre postérieur

Au trot, lors d'une boiterie d'un membre postérieur, le cheval appuie moins sur son membre postérieur douloureux et conserve la hanche dans une position antalgique, plus haute que celle du membre sain. Ainsi, un cheval présentant une boiterie de son postérieur gauche, maintient son bassin en position plus haut lorsqu'il engage son postérieur gauche et conserve une position de bassin haute pendant la majeure partie de la foulée. Cette position donne l'impression que la hanche gauche reste plus haute que la hanche droite et que cette dernière est au contraire plus mobile. L'observation des muscles fessiers permet de distinguer la contraction des muscles (également appelée hip hike) précédant le poser du membre boiteux afin de limiter l'appui et la poussée de ce membre au sol.

Contrairement aux antérieurs, l'étude de Keegan et al. (2013) a permis de montrer que c'est l'élévation du bassin qui possédait la meilleure corrélation avec la détection subjective d'une boiterie postérieure. Ce paramètre est lié au fait que la hanche du membre boiteux est en moyenne plus haute que celle de l'autre membre sur l'ensemble de la foulée.

Il est également possible de noter une diminution de la descente des boulets lors d'une boiterie postérieure sur le membre boiteux.

La détection du membre postérieur boiteux s'effectue donc en regardant la montée des hanches lors de l'engagement de chacun des postérieurs afin de détecter celui pour lequel la hanche atteint le point le plus haut. A l'inverse, pour les antérieurs, la détection du membre boiteux s'effectue en regardant la tête s'abaisser sur l'antérieur sain et monter sur l'antérieur boiteux.

6) Cas des boiteries compensatoires

Il arrive parfois que certaines boiteries soient bilatérales. Dans le cas des antérieurs, il est possible de noter un raccourcissement de la foulée et une absence de descente des boulets. Le plus souvent, la boiterie n'est pas équivalente entre les deux antérieurs et l'un des membres est plus boiteux que l'autre.

Certaines boiteries peuvent également engendrer des boiteries compensatoires sur d'autres membres (Uhlir et al. 1997). Il est alors important que le vétérinaire distingue le siège primaire de la boiterie. Une boiterie postérieure induit une boiterie compensatoire de l'antérieur ipsilatéral. En effet, au trot, une boiterie primaire d'un postérieur génère un soulagement sur le membre antérieur controlatéral, ce qui porte à confusion sur l'existence d'une boiterie de l'antérieur ipsilatéral, qui n'est en réalité qu'une boiterie compensatoire. L'étude de Kelmer et al. (2005) a notamment montré qu'une augmentation de 50% de la boiterie postérieure entraîne la même augmentation que sur l'antérieur ipsilatéral. A l'inverse, une boiterie d'un membre antérieur entraîne une réduction de la poussée du postérieur controlatéral pour limiter l'appui sur le membre boiteux. Il est également possible qu'une compensation se mette en place sur le postérieur ipsilatéral afin de réduire le poids sur l'antérieur. Pourtant l'augmentation de 50% de la boiterie antérieure n'augmente que de 5% la boiterie du postérieur controlatéral.

7) Localisation de la pathologie par anesthésies étagées

Le recours à des anesthésies locorégionales étagées est relativement fréquent lors d'un examen locomoteur. En effet, après avoir déterminé le membre boiteux, et lorsque l'atteinte n'est pas clairement identifiable, il est nécessaire de cibler le plus précisément possible la zone atteinte. C'est en localisant le site de l'affection qu'il est possible d'orienter le diagnostic et de choisir les meilleurs examens complémentaires réalisables.

Les anesthésies locorégionales reposent sur le principe qu'une zone insensibilisée par des injections d'anesthésiques péri-neurales est moins douloureuse et entraîne une diminution voire une suppression de la boiterie.

Elles sont réalisées selon un ordre précis de la partie distale du pied vers la partie proximale du membre. En effet, les anesthésiques étudiés diffusent en périphérie de la zone anesthésiée et une anesthésie d'une région proximale entraîne une anesthésie de toute la région la plus distale.

Des anesthésies intra-articulaires peuvent également être réalisées afin de déterminer si une articulation est le siège de la douleur recherchée.

Suite à cette anesthésie il sera nécessaire de ré-effectuer un examen locomoteur complet afin d'évaluer la réponse aux anesthésiques. Le test est positif si l'anesthésie locorégionale entraîne une diminution ou une disparition de la boiterie. Il est alors intéressant de grader en pourcentages l'amélioration induite par ce test. Grâce à ces examens, il est parfois possible d'identifier le siège de la boiterie.

Il est tout de même important de garder en tête que ces manipulations ne sont pas sans risque pour le patient, notamment pour les anesthésies intra-articulaires pouvant engendrer des arthrites septiques en cas de contamination et sont extrêmement chronophages pour le vétérinaire et ne sont ni sensibles ni spécifiques à 100% (Maliye et al. 2013).

B. DÉROULEMENT DE L'EXAMEN LOCOMOTEUR EN PISTE

L'examen locomoteur précédemment décrit permet généralement d'établir un diagnostic suffisamment précis de la pathologie. Cependant, il arrive que certains cas ne révèlent une gêne que dans des conditions d'exercices extrêmes ou spécifiques. Pour ces derniers, il est alors nécessaire de réaliser un bilan locomoteur dans les conditions réelles d'exercice.

Si nous nous intéressons plus particulièrement au cas du cheval de course, un examen locomoteur classique peut s'avérer insuffisant si la boiterie ne se déclare qu'à grande vitesse ou que le cheval présente une contre-performance sans être forcément associée à des signes cliniques. L'examen en piste est encore relativement peu fréquent de par la complexité d'organiser une telle évaluation (disponibilité d'une piste, observation précise complexe etc.). Lorsqu'il est mis en place, le cheval est tout d'abord échauffé dans les mêmes conditions qu'un entraînement classique puis évalué soit par paliers croissants de vitesses soit en vitesse maximale de compétition. Le cheval est suivi d'une voiture qui se place latéralement au cheval afin que le vétérinaire puisse avoir la meilleure vision possible du cheval à l'effort.

Il est intéressant de noter les conditions précises permettant l'expression de la boiterie (vitesse, sens du tournant et placement par rapport à la corde, durée d'effort etc.). On évaluera également le grade de boiterie au cours de l'effort : il est possible qu'une boiterie diminue au cours de l'effort ou au contraire s'aggrave. De même il est également possible d'observer des inversions de boiteries entre les différents membres du cheval.

Cet examen s'avère donc particulièrement important à mettre en œuvre pour cibler au mieux l'affection primaire du cheval. Il est également possible de compléter ces examens par des anesthésies diagnostiques et d'évaluer la réponse du cheval à grande vitesse.

C. FIABILITÉ DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION SUBJECTIVE

Les boiteries représentent le motif d'appel le plus commun chez le cheval après les coliques. L'ensemble des examens permettant d'établir le diagnostic exact nécessite une excellente compétence du vétérinaire, l'accès à des techniques d'imagerie de pointe et de ce fait engendre des coûts importants dans le fonctionnement de la filière équine. Aujourd'hui, les méthodes d'évaluations subjectives restent encore les plus utilisées sur le terrain. Elles consistent à évaluer la sévérité de la boiterie et à la grader selon la grille AAEP.

Plusieurs études ont suggéré une faible sensibilité et une mauvaise répétabilité des évaluations subjectives de la locomotion. Les premières expériences menées portaient sur un nombre limité de chevaux et les évaluations étaient réalisées sur la base de visionnage vidéo ou l'utilisation de tapis roulant pouvant fausser les mesures.

Ainsi, Keegan et al. (2010) se sont intéressés à la répétabilité de l'évaluation subjective d'une boiterie en fonction de son grade lors d'examen orthopédique. 131 chevaux et 5 cliniciens ont été sélectionnés pour participer à cette étude. Chaque clinicien indique le membre boiteux et le grade de boiterie selon l'échelle AAEP après un aller-retour au trot en ligne droite puis effectue une nouvelle notation après un examen locomoteur complet. Les résultats obtenus sont univoques : Dans 76,6% des cas, les vétérinaires sont en accord dans le choix du membre boiteux après une simple évaluation en ligne droite, alors qu'ils ne sont plus en accord que dans 72,9% des cas après un examen complet. Ces données indiquent donc que la réalisation d'un examen complet impliquant un examen sur le cercle et la réalisation de flexions, influencent peu le diagnostic. De plus, la détection des boiteries antérieures semble légèrement meilleure que celle des boiteries postérieures.

Lorsque le score AAEP est $> 1,5$, les vétérinaires s'accordent dans 93,1% des cas sur le membre boiteux alors que ce pourcentage décroît à 63,9% lorsque le grade est $< 1,5$.

Lorsqu'il est demandé aux vétérinaires de choisir le membre le plus boiteux, ils ne s'accordent que dans 51,6% des cas ce qui est relativement faible dans le cadre d'un diagnostic précis.

Ces données permettent de conclure à une forte insuffisance de l'évaluation subjective qui trouve ses limites à la fois dans l'expérience du vétérinaire mais aussi dans l'acuité et la résolution visuelle liée au fonctionnement de l'œil humain qui n'est pas suffisamment sensible pour détecter de faibles variations de symétrie. Ainsi, il semble intéressant de développer des systèmes d'évaluations objectives permettant de s'affranchir des limites précédemment mises en avant.

De nombreuses études se sont attachées à comparer la sensibilité d'une évaluation subjective à celle obtenue avec des systèmes de mesures objectives. C'est notamment le cas de Keegan et al. (2013) qui ont comparé les données obtenues à partir de capteurs inertiels placés sur le corps des chevaux et les résultats des évaluations de locomotion des chevaux réalisées par 3 vétérinaires expérimentés. Pour cela, 106 chevaux ont été inclus dans l'étude. Cette population, volontairement hétérogène, est composée de chevaux sains ou de chevaux présentant des boiteries de grade inférieur ou égal à 3 selon la grille AAEP. Chaque cheval est équipé de capteurs inertiels et évalué par chaque vétérinaire selon un examen locomoteur standard incluant une évaluation en ligne droite, en cercle et des flexions.

Les résultats obtenus lors de cette étude permettent de conclure à une variabilité interindividuelle non négligeable puisque les vétérinaires sont parvenus à un accord sur la classification de la boiterie dans 65,8% ($\kappa = 0,32$) pour les boiteries antérieures et 57,9% ($\kappa =$

0,14) pour les boiteries postérieures lorsque le grade est < 1.5. Ces résultats sont cependant plus encourageants que d'autres études similaires qui ne réalisaient qu'un examen en ligne droite. Les mesures enregistrées par les capteurs inertiels sont positivement et fortement corrélées aux évaluations subjectives. Il apparaît donc que l'usage d'une méthode objective, bien qu'elle reste insuffisante à elle seule, peut apporter des informations complémentaires lors de l'évaluation de la locomotion d'un cheval.

Dans une étude similaire, Mc Cracken et al. (2012) s'était également intéressé à la sensibilité de détection d'une boiterie de faible grade. Pour cela, 50 chevaux ont été équipés d'un fer muni de pas de vis créant une boiterie de grade variable en fonction du degré d'enfoncement de la vis. Des capteurs inertiels permettent une évaluation objective de la boiterie qui est ensuite comparée à l'évaluation subjective de trois observateurs expérimentés. Ils ont ainsi démontré que le système objectif détecte une boiterie plus rapidement que les observateurs dans 58,33% des cas. Alors que les observateurs ne détectent la présence d'une boiterie plus rapidement que dans 8,33% des cas. Enfin, les vétérinaires détectent une boiterie au même grade que le système objectif dans 33,33% des cas. Il apparaît donc que le système objectif est capable de détecter une boiterie pour une pression de faible intensité exercée sur le sabot alors que l'évaluation subjective nécessite une boiterie de plus haut grade.

L'évaluation subjective, actuellement la plus utilisée par les vétérinaires sur le terrain, ne peut être considérée comme un Gold Standard de l'examen orthopédique du cheval de par sa faible sensibilité notamment pour des boiteries de faible grade. Au vu des avancées technologiques et des demandes de la part d'une clientèle de plus en plus exigeante, l'approche objective semble être une voie intéressante à mettre en application sur le terrain afin d'améliorer le diagnostic de boiterie.

II - INTÉRÊT DE LA MÉTHODE OBJECTIVE DANS LA DÉTECTION DE BOITERIES

1) Examen locomoteur sur le terrain

Les méthodes objectives de détection des boiteries offrent une meilleure sensibilité que la simple méthode subjective. Bien que l'utilisation des systèmes de mesures ne puisse se suffire à elle-même pour le moment ; ils fournissent des informations précieuses permettant d'orienter au mieux le diagnostic du vétérinaire.

Les premiers systèmes objectifs étaient relativement peu adaptés aux conditions réelles de terrain : les plaques de force, les tapis roulants et systèmes vidéo nécessitent un temps d'apprentissage pour le cheval et ne peuvent être mis en place que dans des centres spécialisés.

Cependant, de nouveaux modèles se présentant sous la forme de petits capteurs inertiels, facilement adaptés aux conditions de terrain commencent à voir le jour. Certaines cliniques vétérinaires s'en sont équipées et offrent ainsi une combinaison entre une évaluation subjective par le vétérinaire et objective.

Le « Lameness Locator » est un système d'accélérométrie composé de trois petits capteurs permettant de détecter la présence d'une boiterie ou d'un défaut de symétrie. Facile d'utilisation et mis en fonctionnement très rapidement, il est tout à fait applicable en condition de terrain. Il offre également la possibilité de distinguer les boiteries d'impact et de poussée (distinction fondamentale qu'il n'est pas possible de réaliser à l'œil nu).

Ces systèmes offrent notamment une grande fiabilité dans les mesures en s'affranchissant des facteurs liés au terrain ou à la vitesse. Ils sont donc notamment utilisables sur des chevaux à l'exercice et s'avèrent de ce fait beaucoup plus pratiques qu'une évaluation « au loin » par le vétérinaire s'il n'a pas la possibilité de suivre le cheval en voiture. À grande vitesse, il offre une meilleure précision que la vue du vétérinaire limitée par la résolution visuelle.

2) Suivis des patients à long terme

a) Suivi de l'évolution d'une pathologie au cours du temps

Le suivi des patients représente une part importante des consultations de locomotion. Pourtant, entre deux suivis, si le cheval n'a pas été filmé lors des consultations précédentes, il est difficile pour le vétérinaire d'évaluer une évolution si celle-ci reste faible.

Si cette pathologie évolue depuis longtemps, une prise en charge sur le long terme peut être confrontée à un changement de vétérinaire, une évolution des connaissances et compétences de celui-ci, et il devient alors compliqué d'effectuer un vrai suivi.

La méthode objective dans ce cas offre la possibilité d'accéder facilement aux données précédemment enregistrées et de refaire les mêmes mesures. Les résultats sont alors beaucoup plus significatifs et permettent de chiffrer l'évolution du cheval au cours du temps.

b) Validation des effets d'un médicament ou d'une anesthésie

De la même façon, les importantes variations induites par les évaluations subjectives ne permettent pas de conclure de façon certaine à l'efficacité d'un médicament ou d'une anesthésie. Pourtant, la validation de certains protocoles passe nécessairement par une évaluation locomotrice qui se doit d'être la plus fiable possible. Le recours à des mesures objectives offre donc des résultats scientifiques plus représentatifs.

Ainsi, Watts et al. (2016), ont utilisé une méthode objective par des capteurs inertiels pour étudier les effets du resveratrol sur la locomotion de chevaux présentant des pathologies du tarse.

De même, Schumacher et al. (2013), ont utilisé la même méthode pour déterminer l'efficacité de la kétamine chlorhydraté sur des douleurs de pieds.

c) Consensus vétérinaires et comparaison de cas

Comme nous l'avons précédemment décrit, malgré l'existence de la grille AAEP, la détection du membre boiteux et le choix du grade de la boiterie sont « vétérinaire dépendant ». Seul le dernier grade correspondant à une suppression totale de l'appui du membre fait consensus. En ce sens, il est très compliqué de transmettre ou de comparer différents cas de boiterie puisque les évaluations ne seront pas les mêmes en fonction des vétérinaires. Il peut être donc intéressant de mettre en place des moyens objectifs d'étude afin que chacun puisse se fixer sur les mêmes données.

3) Point d'appui d'une visite d'achat

De plus en plus procédurier, le monde équin ne laisse aucune place à l'approximation des diagnostics. De par l'aspect financier très important dans la filière des courses et du sport, le vétérinaire doit être capable de se protéger contre une clientèle exigeante et prête à mener des procédures judiciaires en cas d'erreur.

Les visites d'achat font notamment partie de ces consultations délicates pouvant amener à un mécontentement de l'acheteur ou du vendeur. Il est alors conseillé au vétérinaire d'inscrire par écrit l'ensemble des éléments relevés lors de cette visite. L'examen locomoteur représente d'ailleurs la part la plus importante de cette visite. L'utilisation de méthodes objectives permettrait de protéger le vétérinaire puisque des données chiffrées et enregistrées conforteraient le diagnostic.

4) Prévisions des aptitudes ou des causes de non-performance

Les évaluations objectives de locomotion du cheval étant beaucoup plus sensibles que l'évaluation par l'œil du vétérinaire, elles peuvent être intéressantes pour trouver les causes de non-performance de certains chevaux ou évaluer les aptitudes de jeunes chevaux.

De nombreuses études se sont appuyées sur des mesures d'accélérométrie pour déterminer le potentiel de chevaux de dressage (Barrey et al. 2002), de polo (Pfau et al. 2015) et de saut d'obstacle (Barrey et al. 1997).

Les aptitudes des trotteurs ont également été fortement étudiées. Par exemple, l'étude de Barrey et al. (1995) s'est attachée à définir des critères d'évaluation de jeunes trotteurs permettant de prédire leur potentiel sportif. 24 jeunes trotteurs ont été classés en trois groupes en fonction de leur indice de performance et soumis à trois tests de vitesse croissante dont le dernier s'effectue à vitesse maximale. Les données d'accélérométrie relevées ont permis de sélectionner plusieurs critères liés aux performances : ils ont ainsi montré que la vitesse maximale est positivement corrélée à la longueur de la foulée. De plus, chez les meilleurs trotteurs, la vitesse maximale, la longueur de la foulée et la fréquence de foulée sont plus importantes que chez les moins bons performers. Les valeurs de références obtenues pourront ainsi orienter les futures évaluations du potentiel des jeunes trotteurs.

5) Apport de la méthode objective à l'apprentissage du vétérinaire

L'utilisation de méthodes objectives peut également s'inscrire dans un objectif d'apprentissage pour le jeune vétérinaire qui ne possède pas l'expérience nécessaire pour établir un diagnostic juste pour des boiteries compensées ou des boiteries de faible grade. C'est pourquoi plusieurs cliniques et écoles vétérinaires se sont munies des systèmes Equimetrix et du Lameness Locator. Ceux-ci permettent à la fois d'aiguiser l'œil du jeune vétérinaire par une évaluation subjective, tandis que l'appareil fournit le résultat objectif de la boiterie.

III - PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION

A. APPROCHE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION EN LABORATOIRE

1) Principe d'évaluation objective de la locomotion

L'observation objective de la locomotion permet de s'affranchir de la variabilité inter et intra-individuelle lors de l'évaluation d'une boiterie. La création d'outils de mesures de la locomotion chez le cheval offre la possibilité d'obtenir des variables chiffrées et répétables. Certaines méthodes reposent sur un découpage de l'animal en différents segments auxquels peuvent être appliqués les mêmes lois physiques et mécaniques que celles employées pour des objets inanimés tandis que d'autres prennent en compte le mouvement global de l'animal.

Deux perspectives peuvent être employées pour décrire et comprendre le mouvement de chacun des segments puis du cheval dans son ensemble.

Analyse cinématique :

L'approche cinématique consiste en une description et une analyse de la géométrie du mouvement sans prendre en compte les forces qui le provoquent. Elle requiert des données géométriques, linéaires et angulaires qui sont rapportées au temps. Elle donne ainsi la possibilité de parfaire l'analyse subjective d'un expérimentateur en lui offrant la possibilité d'exploiter des données chiffrées qu'il n'obtiendrait pas à l'œil nu en situation d'exercice.(Barrey et al. 1993)

Analyse cinétique :

L'approche cinétique repose au contraire sur la répartition des forces internes et externes qui provoquent le mouvement du cheval. Elle permet d'expliquer le mouvement par des calculs de forces, de répartitions de charge et d'énergie (Weishaupt et al. 2002). Cette analyse se détache de la précédente en étudiant des notions auxquelles un expérimentateur ne pourrait avoir accès en condition d'examen subjectif.

Analyse d'électromyographie :

L'approche par électromyographie permet de mesurer l'activité musculaire associée au mouvement.(Robert et al. 2003)

Ces différentes méthodes ont donné lieu à la mise en place de nombreux dispositifs permettant l'obtention de données fiables.

2) Analyse cinématique du mouvement

a) Principe des systèmes d'analyse cinématique

L'analyse cinématique étudie la géométrie du mouvement au cours du temps. Elle offre des données chiffrées décrivant les différentes phases du mouvement, là où la simple étude subjective de la locomotion ne permet qu'une évaluation qualitative. Des données temporelles, linéaires et angulaires sont recueillies à partir d'un découpage du corps du cheval en de multiples segments de sorte à pouvoir qualifier entièrement le mouvement.

Le système actuellement le plus développé est l'enregistrement vidéo qui permet de réaliser un enregistrement du mouvement qui est ensuite exploité dans un second temps grâce à des arrêts sur image. D'autres systèmes optoélectroniques, électromagnétiques ou ultrasonores sont développés en laboratoire mais restent peu réalisables sur le terrain.

i) Marqueurs

Quel que soit le dispositif d'enregistrement choisi, la réalisation d'une analyse cinématique du mouvement nécessite la mise en place de marqueurs afin de découper artificiellement le corps de l'animal en différents segments.

Ces marqueurs sont le plus souvent passifs, c'est-à-dire qu'ils reflètent uniquement le spectre de lumière visible ou infra-rouge avec lequel ils sont éclairés lors de l'enregistrement. Il existe également des marqueurs actifs équipés d'un système LEDs qui créent leur propre faisceau lumineux sous forme de flash à des moments définis. Ces marqueurs présentent notamment l'avantage de fournir une excellente résolution en 3 dimensions et une acquisition de données facilitées. Ils restent cependant réservés à des travaux en laboratoire par leur exigence en conditions d'éclairage et de branchement des capteurs. Les systèmes sans marqueurs sont également possibles mais restent largement minoritaires à l'heure actuelle.

La position exacte des marqueurs est fondamentale pour que la mesure puisse être correctement interprétée. Il est donc nécessaire que l'opérateur les dispose selon des repères anatomiques précis et procède à leur disposition lui-même à chaque mesure afin d'éviter les variations de position. Ils peuvent être disposés des parties les plus distales des membres jusqu'à la ligne du dos afin d'évaluer la mobilité de chaque partie du corps. Les marqueurs doivent également être correctement fixés afin qu'ils ne puissent pas tomber lors d'un exercice à vitesse soutenue ou lors de conditions réelles d'exercice.

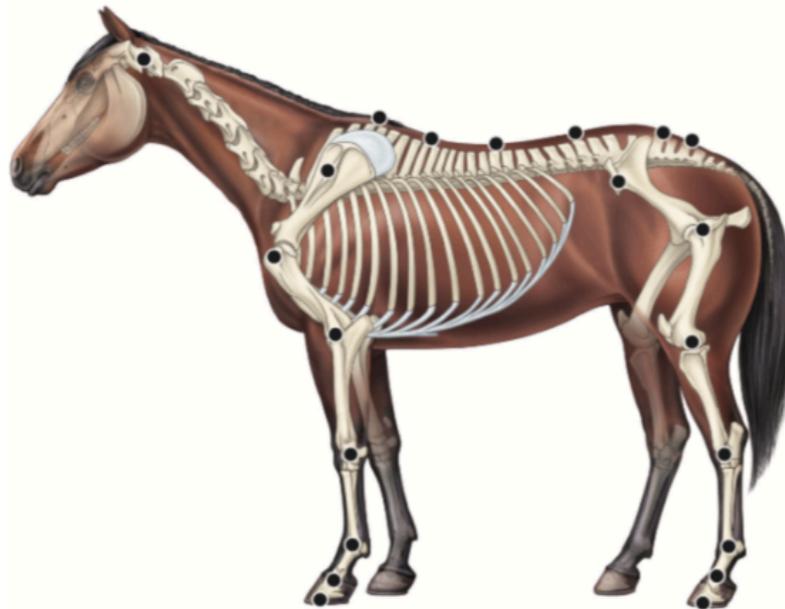


Figure 1 : Emplacement des marqueurs communément utilisés dans les analyses cinématiques (BACK AND CLAYTON 2013)

Le choix de la taille des marqueurs est également important : Les marqueurs doivent être de taille d'autant plus grande que la zone analysée chez le cheval est grande. Ainsi, si l'intégralité du cheval est évaluée, la position des caméras se fera à plus grande distance du cheval et les marqueurs devront donc être de taille importante. En moyenne, on choisit des marqueurs entre 1 et 3 cm de diamètre.

La forme des marqueurs est également à choisir en fonction de l'analyse souhaitée. Pour une analyse bidimensionnelle, des marqueurs circulaires sont choisis. Pour une analyse tridimensionnelle nécessitant des mesures angulaires, les marqueurs sphériques sont nécessaires.

ii) Conditions de réalisation des tests cinématiques

L'analyse cinématique se révèle relativement exigeante en termes de préparation du dispositif et des conditions de réalisation des tests. C'est pourquoi ce type d'étude est relativement peu utilisé sur le terrain et est essentiellement réservé à des cliniques spécialisées ou des laboratoires dans lesquels le dispositif est maintenu en permanence (système QALYSIS).

Le choix d'une analyse bidimensionnelle ou tridimensionnelle est également une source possible de complications. Lors d'une analyse bidimensionnelle, la présence d'une seule caméra est suffisante à condition d'évaluer le cheval sur une ligne droite et de manière bidimensionnelle. Tout écart à cette ligne peut entraîner des distorsions de mesures et des erreurs d'interprétation. L'analyse tridimensionnelle se révèle légèrement plus complexe dans sa réalisation puisqu'elle nécessite la présence de quatre caméras avec un angle de vue suffisant pour inclure l'ensemble des marqueurs. Cette dernière permet toutefois de

s'affranchir du tracé effectué par le cheval et d'obtenir des valeurs d'angulations interprétables au cours du mouvement.

Les conditions de réalisation doivent être évaluées en amont de la période d'enregistrement. En effet, il est important de définir précisément le cadre de mesure, l'aire d'enregistrement, le positionnement des caméras et de l'éclairage et la position des marqueurs sur le cheval.

Différentes aires d'évolution peuvent être choisies pour réaliser les enregistrements :

Piste expérimentale de mesure :

La piste expérimentale de mesure était la méthode de mesure la plus communément utilisée avant l'avènement du tapis roulant. Elle permet d'évaluer le cheval sur une piste longue de quelques dizaines de mètres et vers laquelle sont orientés les caméras et l'éclairage mis en place en amont des périodes d'expérimentation. Cette technique reste l'une des plus simples à mettre en œuvre mais n'offre pas la possibilité d'enregistrer des valeurs sur une grande distance. Il est alors nécessaire de répéter les mesures un grand nombre de fois. De plus, cette technique n'est applicable que dans le cadre d'une évaluation à vitesse réduite.

Tapis roulant :

Le tapis roulant est un dispositif couramment utilisé par des cliniques et laboratoires spécialisés dans l'évaluation de la locomotion du cheval. Il s'avère particulièrement intéressant pour analyser le déplacement du cheval à grande vitesse et sur de longues durées. Il est assez aisé d'installer l'ensemble du matériel d'enregistrement à un emplacement fixe pour la réalisation des mesures. La stabilité de la vitesse, imposée par le tapis permet d'évaluer le mouvement du cheval avec une très grande précision et une bonne répétabilité.



Figure 2 : A : Test cinématique réalisé sur un cheval évoluant sur un tapis roulant (Robert 2003)



Figure 3 : B : Ensemble du dispositif d'enregistrement des données cinématiques et emplacement des caméras dans le cadre d'une analyse tridimensionnelle (Robert 2003)

Les études de Barrey et al. (1993) ont cependant montré que les chevaux évalués sur tapis roulant présentent une longueur et une fréquence de foulée plus élevées que pour des chevaux évalués à la piste. De plus, d'après Buchner et al. (1994), le tapis roulant permet un poser plus précoce des membres antérieurs, une plus grande rétraction des membres antérieurs et postérieurs en fin d'appui et des déplacements verticaux amoindris au niveau des pieds et du garrot lors de la phase de propulsion. Les chevaux évalués sur tapis roulant présentent donc une modification de leur locomotion qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les enregistrements. De même, les forces mises en jeu pour créer le mouvement et l'entretenir ne sont pas les mêmes que celles employées sur une piste classique puisque le cheval exploite en partie l'énergie créée par le mouvement du tapis.

Les chevaux subissent également plusieurs entraînements sur tapis avant la réalisation des enregistrements. En effet, les chevaux sont habitués préalablement à se déplacer sur le tapis afin de limiter au maximum le stress et les mouvements parasites lors des premiers essais. Les chevaux sont généralement plus à l'aise à vitesse élevée. L'interprétation de données n'est donc pas immédiate et requiert un temps de préparation important ce qui rend l'usage du tapis roulant relativement limité lors d'examens locomoteurs classiques.

Piste d'entraînement équipée :

La piste d'entraînement est une méthode permettant de s'affranchir des modifications induites par l'exercice sur tapis roulant et de reproduire au mieux les conditions d'exercice. L'analyse de la locomotion s'avère ainsi plus pertinente sur des trotteurs ou galopeurs que l'on rapproche au maximum de leur condition d'exercice réelle. Bien qu'attrayante, cette méthode s'avère relativement complexe à mettre en place : Elle nécessite notamment une très bonne définition des caméras (500 images/s) qui réalisent des enregistrements à distance des chevaux (Back & Clayton, 2013).

Différentes modalités sont possibles pour pallier le manque de précisions des mesures : il est possible de placer une caméra en voiture embarquée suivant le cheval en parallèle. Cette technique offre la possibilité d'enregistrer un grand nombre de foulées et d'obtenir une bonne définition d'image si la voiture parvient à rester à hauteur constante du cheval. Certaines études ont choisit de placer une caméra mobile au centre de la piste pouvant suivre le cheval lorsqu'il se déplace autour. Ce choix de disposition est couplé à la mise en place de marqueurs au sol permettant de calculer les angulations lors de l'interprétation des enregistrements. Plus récemment, des systèmes de drones avec caméras embarquées ont permis d'obtenir des enregistrements vidéo.

Ces techniques restent toutefois extrêmement compliquées à mettre en œuvre sur le terrain et nécessitent un temps de préparation relativement long. Elles sont donc peu applicables lors d'un examen vétérinaire classique sur le terrain.

iii) Enregistrement et transformation des données cinématiques

À partir des données brutes enregistrées lors des examens précédemment décrits, des logiciels informatiques transforment ces informations en données facilement interprétables pour le clinicien.

Calibrage

Cette première étape consiste à replacer chacune des données correspondant à une position précise du cheval dans l'espace à un instant donné dans une aire d'étude prédéfinie selon le modèle mathématique choisi.

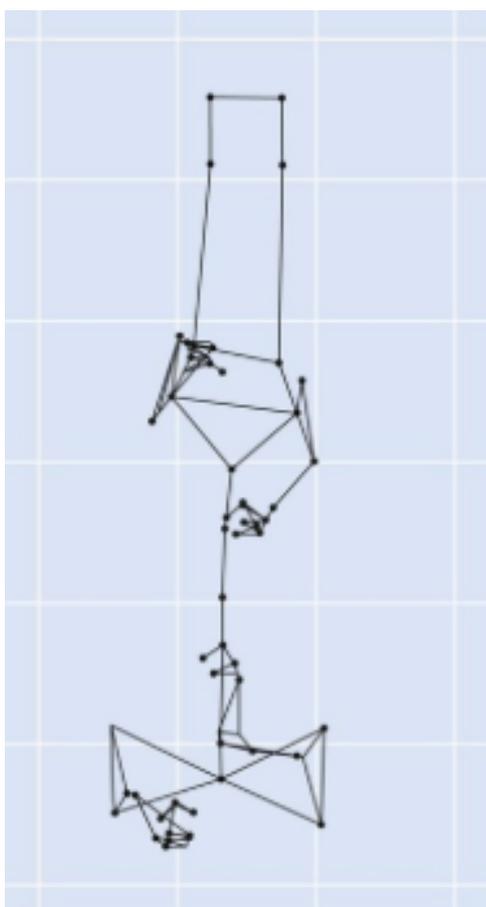


Figure 4 : Représentation des données collectées et enregistrées par le logiciel cinématique à partir de la localisation des marqueurs dans l'espace (Back and Clayton 2001)

Lors d'une analyse bidimensionnelle, le mouvement est représenté sous la forme d'un rectangle plan ou d'une règle linéaire. Cette méthode nécessite que le cheval évolue exactement sur une ligne précise prédéfinie en fonction de la position des dispositifs d'enregistrement. Si le cheval dévie de cette aire plane, des erreurs sont alors introduites dans l'algorithme et peuvent entraîner une mauvaise interprétation des données. Lorsque le cheval évolue sur une ligne parallèle à celle décrite, le logiciel informatique est capable de réaliser une correction de sorte à réduire l'erreur. Cependant, si le cheval décrit une oblique lors de l'enregistrement, le mouvement peut être perturbé. Pour des angles inférieurs à 15° , l'erreur est considérée comme mineure (<5%).

Pour une analyse tridimensionnelle, le modèle de reconstruction est projeté dans les trois dimensions de l'espace. La résolution est d'autant plus grande que le nombre de points enregistrés est important.

Les logiciels réalisent le calibrage de manière autonome. Ils sont capables de localiser les caméras, de calibrer les volumes, de corriger les angles non respectés et de calculer l'erreur de mesure.

Fréquence d'échantillonnage

La fréquence d'échantillonnage correspond au nombre d'unités mesuré par unité de temps. Les études cinématiques utilisent la seconde comme unité de temps de référence. La fréquence d'échantillonnage s'exprime donc en Hertz. Cette définition sous-entend donc que la précision et la diminution des biais de mesures sont d'autant plus importants que la fréquence d'échantillonnage est élevée. Les analyses cinématiques utilisent généralement des fréquences de 120 Hz. Cependant, lorsque les études portent sur des phases précises de la foulée, il peut être nécessaire d'augmenter cette valeur pour obtenir une meilleure précision.

Numérisation

La numérisation consiste à déterminer la position des marqueurs et à les coordonner entre eux. Cette étape permet notamment d'accéder quasi instantanément aux données récoltées. Bien que réalisée de manière automatique par les logiciels, il est possible également que le manipulateur choisisse lui-même les capteurs impliqués dans les mesures. Ce dernier peut alors corriger les erreurs détectées par le système (type capteurs non reconnus...) avant de réaliser la mesure suivante.

Lissage

Lors d'enregistrement à grande vitesse, il est possible que la numérisation induise la présence d'un bruit de fond rendant l'interprétation des données moins précise. Un système de lissage des données est utilisé par le logiciel afin de réduire ce bruit de fond. Il peut se faire soit en utilisant un filtre avec une technique d'ajustement de courbe ou en introduisant un passe-bande avec une coupure de bande à 10-15Hz. Ce système réduit les perturbations de faibles fréquences de sorte à ne conserver que les variations réellement liées au mouvement.

Transformation

La transformation consiste à replacer les informations obtenues précédemment dans une échelle selon les trois coordonnées x , y , z . Une transformation directe linéaire est couramment utilisée en combinant des données bidimensionnelles pour obtenir une donnée finale dans les trois dimensions de l'espace.

Lorsque l'analyse cinématique porte sur les changements d'angles articulaires, il est nécessaire de définir un système tridimensionnel pour chaque segment impliqué dans le mouvement de l'articulation.

Normalisation

La normalisation représente l'étape finale permettant d'accéder à des données interprétables par le clinicien. Elle consiste en une standardisation de plusieurs paramètres les rendant ainsi comparables entre différents essais et différents chevaux.

La normalisation repose tout d'abord sur le calcul de la durée moyenne de la foulée et de ses différentes phases, ramené à des pourcentages comparables entre différents patients. De nombreuses variables utilisées dans la description de la locomotion sont dépendantes de la vitesse. L'analyse de la vitesse est donc également intéressante bien que compliquée à mettre en œuvre. En effet, la vitesse du cheval doit être maintenue constante au cours de l'enregistrement et doit être correctement définie au préalable. De plus, sur des chevaux présentant une boiterie, celle-ci ne s'exprime pas forcément de façon similaire en fonction de la vitesse choisie et de l'affection. Il est possible alors de réaliser des régressions linéaires afin de prédire l'évolution des variables dépendantes de la vitesse.

Les transformations mathématiques réalisées par les logiciels informatiques permettent de supprimer les facteurs liés au temps et à la vitesse qui peuvent être différents entre chaque enregistrement. Il est intéressant de rapporter ces deux valeurs précédentes à des valeurs individuelles liées à chaque cheval. Ainsi, il est possible d'exprimer le temps et la vitesse en fonction de la taille au garrot du cheval et de l'accélération gravitationnelle $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ et de standardiser chacune des variables étudiées :

$$\text{Accélération} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}^2} \quad \text{Donc temps} = \sqrt{\frac{\text{distance}}{\text{accélération}}} = \sqrt{\frac{\text{hauteur}}{g}}$$

$$\text{Vitesse} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}} = \frac{\text{distance}}{\sqrt{\frac{\text{distance}}{\text{accélération}}}} = \sqrt{\text{distance} * \text{accélération}} = \sqrt{\text{hauteur} * g}$$

Standardisation des phases de la foulée	Standardisation de la vitesse	Standardisation des forces impliquées
$\text{FouléeDU} = \frac{\text{durée foulée}}{\sqrt{\text{hauteur}/g}}$ $\text{AppuiDU} = \frac{\text{durée d'appui}}{\sqrt{\text{hauteur}/g}}$ $\text{PropulsionDU} = \frac{\text{durée propulsion}}{\sqrt{\text{hauteur}/g}}$ <p>FouléeDU : Durée de la foulée standardisée AppuiDU : Durée de la phase d'appui standardisée PropulsionDU : Durée de la phase de propulsion standardisée</p>	$\text{VDU} = \frac{\text{vitesse}}{\sqrt{\text{hauteur} * g}}$ <p>VDU : Vitesse standardisée</p>	$\text{Impulsion} = \text{force} * \text{durée d'appui}$ $\text{IDU} = \frac{\text{force} * \text{durée d'appui}}{\text{poids} * g * \sqrt{\text{hauteur}/g}}$ <p>IDU : Impulsion standardisée</p>

L'obtention de ces valeurs permet de comparer les données enregistrées pour chaque cheval sans induire de biais lié à des modèles d'animaux variés et des conditions d'enregistrements parfois modifiées.

b) Diversité des méthodes d'analyse cinématique

Les principes mathématiques expliqués précédemment sont réalisés de manière automatique par des logiciels informatiques analysant les enregistrements réalisés. Si la méthode employée reste assez similaire entre les différents logiciels, les méthodes d'enregistrement des données brutes s'avèrent quant à elles beaucoup plus variées.

i) Systèmes photographiques

Les systèmes photographiques représentent les plus anciens systèmes d'analyse cinématique de boîtes. L'avènement de la vidéographie a cependant permis de révolutionner cette technique dont la limite principale était le faible nombre de photographies prises par seconde. Le recours à des caméras à haute fréquence permet d'obtenir un nombre d'image conséquent et ainsi une meilleure représentation du mouvement du cheval.

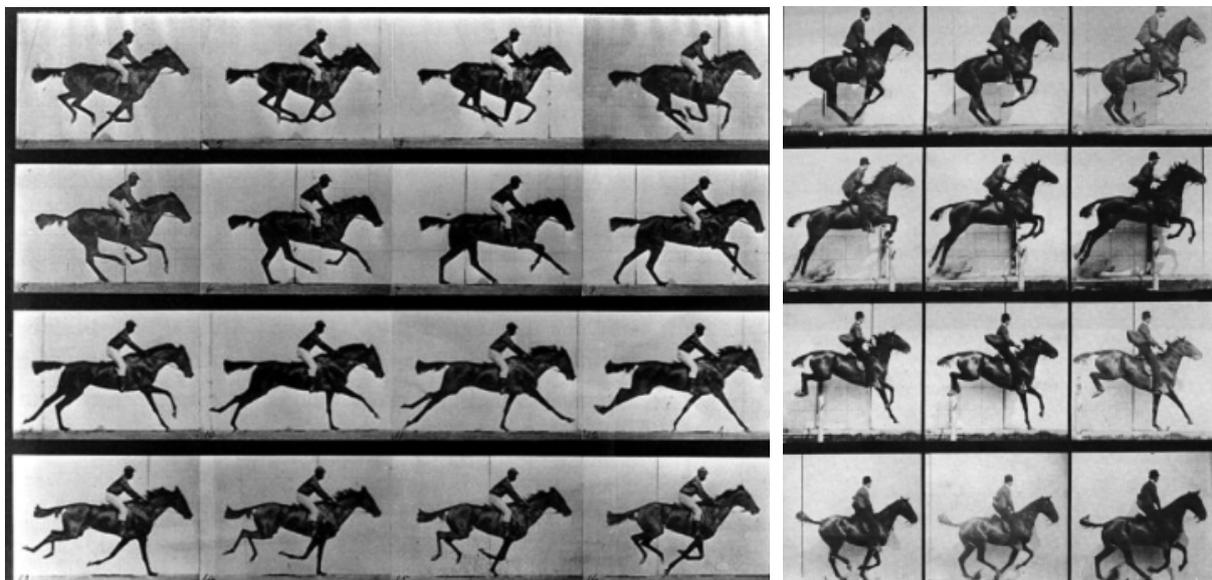


Figure 5 : Premiers enregistrements d'analyse de la locomotion par photographie sur cheval au galop (A) et lors d'un saut (B). (Muybridge 1878)

Lors d'une analyse bidimensionnelle, l'opérateur doit se montrer relativement vigilant sur la position de la caméra placée perpendiculairement par rapport au cheval et aux marqueurs afin d'éviter tout biais de mesure. Dans le cadre d'une analyse tridimensionnelle, la position des caméras revêt une importance moindre tant que l'ensemble des capteurs sont visibles par les caméras à chaque instant.

Le choix de la fréquence d'enregistrement est également important puisqu'il conditionne la précision des mesures. Les études de Linford (1994) ont permis de déterminer une fréquence optimale d'enregistrement à 60 Hz pour une analyse cinématique du mouvement du cheval lorsque l'évaluation se fait à allure réduite. L'augmentation de cette fréquence peut être intéressante dans le cadre d'études sur des phases précises de la foulée et non sur un mouvement global de l'animal ou lorsque le cheval est évalué à plus grande vitesse.

Enfin, la qualité des caméras doit être suffisante pour permettre une bonne distinction des marqueurs entre eux même à grande vitesse.

Ces systèmes photographiques représentent à l'heure actuelle les dispositifs les plus employés pour la réalisation d'études cinématiques. En effet, le matériel utilisé reste facilement accessible et utilisable lors d'examen locomoteurs sur le cheval en clinique spécialisée.

ii) Électrogoniométrie

L'électrogoniomètre est un dispositif de mesure d'angles articulaires. Il se compose de deux segments rigides fixés chacun au niveau des os à de part et d'autre de l'articulation étudiée. Un système articulé relié aux deux segments précédents est placé au centre de l'articulation. Ce système est muni soit d'une jauge de contrainte, d'une fibre optique ou d'un potentiomètre. Chaque mouvement de l'articulation entraîne une modification de l'angle entre les deux segments et donc une variation de résistance proportionnelle à l'angle. Un enregistrement des résistances électriques permet ainsi de suivre les modifications angulaires de l'articulation au cours du mouvement.

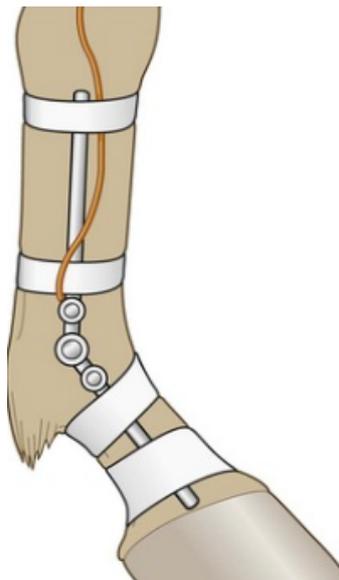


Figure 6 : Electrogoniomètre placé sur l'articulation métacarpo-phalangienne du cheval (Back and Clayton 2001)

Ce type d'enregistrement est particulièrement employé en médecine humaine mais reste très marginale en médecine vétérinaire. Toutefois, il s'avère particulièrement intéressant dans l'évaluation de certaines boiteries et dans le suivi et la rééducation des chevaux suite à une chirurgie orthopédique.

iii) Systèmes électromagnétiques

Les systèmes électromagnétiques sont des dispositifs exclusivement réservés aux travaux en laboratoire ou à des travaux de recherche sur la locomotion du cheval. En effet, cette technique nécessite un environnement de mesure adéquat et l'utilisation d'un matériel complexe et encore aujourd'hui quasiment exclusivement réservé à la médecine humaine. L'enregistrement de données repose sur l'émission d'un champ électromagnétique par une antenne et sur la perturbation de ce dernier par des capteurs spécifiques positionnés sur le cheval. Les différences de potentiels entre chaque capteur renseignent sur leur position précise dans l'espace et déterminent les amplitudes de mouvements, les translations ou les rotations. Un seul capteur est nécessaire pour évaluer la mobilité complète d'un segment (là où les systèmes photographiques nécessiteraient 3 capteurs par segment). Le système Flock and Birds (Ascension Technologies) a ainsi pu être adapté à l'étude cinématique des mouvements du cheval.

Pendant, ces méthodes de mesures restent peu accessibles sur le terrain de par les interférences possibles avec tout objet métallique pouvant être présent dans la zone d'enregistrement, la nécessité de relier chaque capteur à un branchement électrique et la capacité limitée à enregistrer un grand nombre de mesures.

iv) Systèmes d'ultrasons

L'utilisation d'ultrasons constitue également une méthode de mesure intéressante permettant de connaître en temps réel la position d'un segment. Si cette technique se rencontre parfois en médecine humaine, son utilisation reste toutefois très limitée dans le cadre d'un examen locomoteur classique chez le cheval. Certaines cliniques ont pu s'équiper de dispositifs d'enregistrements ultrasonores comme le Zebris CMS-HS adapté de la médecine humaine.

Ces systèmes se composent d'émetteurs d'ultrasons qui sont ensuite détectés par les capteurs munis de microphones positionnés sur le cheval. Ils utilisent ainsi le principe de triangulation ultrasonore permettant de détecter les coordonnées exactes de chacun des capteurs dans les trois dimensions de l'espace.



Figure 7 : A : Zebris CMS-HS : Modèle de fixation des microphones ultrasonores sur les parties distales du membre du cheval.

Figure 8 : B : Position des émetteurs ultrasonores par rapport au cheval de sorte à créer la triangulation ultrasonore. (Back and Clayton 2001)

Ils présentent comme inconvénients de ne pouvoir réaliser que des mesures pour lesquelles la distance entre l'émetteur et les capteurs est faible. De plus, l'enregistrement ne peut se faire que sur des durées limitées. Ainsi, ces systèmes ne sont applicables que dans le cas d'études sur des phases de la foulée uniquement et au pas ou au trot afin d'éviter des erreurs de mesures et des réflexions d'ultrasons qui fausseraient la répétabilité des mesures.

c) Analyse de la symétrie du mouvement et évaluation des boiteries

L'analyse cinématique permet d'obtenir une décomposition fine du mouvement afin d'en extraire les principales caractéristiques. Elle trouve donc son application dans le diagnostic d'une boiterie chez le cheval. La comparaison des mouvements de la tête et du tronc entre les différentes phases de la foulée permet de juger subjectivement du membre boiteux. En s'intéressant à ces mêmes critères, l'analyse objective offre la possibilité de chiffrer et de grader précisément la boiterie grâce à une analyse de la symétrie globale du mouvement.

i) Analyse de Fourier et étude de la symétrie globale du mouvement

L'analyse du mouvement à partir des données cinématiques peut être réalisée par une analyse de Fourier. Le mouvement du cheval au trot peut se représenter sous la forme d'une fonction périodique. Chaque foulée se découpe en une phase de suspension et une phase d'appui décrivant chacune des fonctions sinusoïdales. L'analyse de Fourier consiste alors à décomposer le mouvement en une fonction dite fondamentale correspondant au mouvement

de base et un ensemble de fonctions sinusoïdales multiples de la précédente, appelées harmoniques.

Plusieurs études ont été menées afin de décrire le mouvement par le biais de cette analyse mathématique. L'étude d'Audigié et al. (2002) s'est ainsi intéressée au nombre d'harmoniques nécessaire pour identifier précisément une boiterie.

L'expérience est menée simultanément sur un groupe de 13 chevaux témoins ne présentant pas de boiterie et deux groupes de 12 chevaux présentant une boiterie antérieure et 13 chevaux présentant une boiterie postérieure. Chaque cheval est équipé de 4 marqueurs placés le long de la ligne du dos entre le garrot et la jonction lombo-sacrée au niveau des vertèbres thoraciques T₆ et T₁₃, des vertèbres lombaires L₁ et de la jonction lombo-sacrée. Le marqueur de la jonction lombo-sacrée est noté LS par la suite. Ils sont évalués sur 5 foulées, au trot, en ligne droite et filmés par deux caméras permettant une reconstruction du mouvement en trois dimensions.

L'analyse mathématique réalisée par la suite consiste à décrire le déplacement vertical Z_{exp} de chacun des marqueurs en s'appuyant sur le calcul des harmoniques de Fourier. Le déplacement vertical constitue la méthode de choix dans l'évaluation de l'asymétrie du mouvement s'il on considère qu'une boiterie d'un membre entraîne un report de poids plus important sur l'autre membre et donc une modification de l'élévation verticale entre les différentes phases de la foulée. L'étude de Pourcelot et al. (1997) avait ainsi permis de montrer que l'analyse du mouvement vertical s'avère plus intéressante que le suivi des angulations des articulations en offrant une meilleure sensibilité de mesures.

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

A₀ correspond à la valeur du déplacement vertical lors de la foulée T ; A_i et φ_i représentent respectivement les amplitudes et les phases de l'harmonique i.

Afin de décrire précisément le mouvement, il est possible de déterminer un pourcentage de reconstruction qui permet de connaître le nombre d'harmoniques nécessaires à utiliser pour obtenir une bonne reconstruction du mouvement.

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

Dans cette étude, il a ainsi été démontré que l'usage des deux premières harmoniques permet une reconstruction de 95% du mouvement avec une précision supérieure à 99%. D'après l'étude du mouvement, chaque foulée de trot peut être décomposée en deux oscillations correspondant aux phases d'appui successives des deux diagonaux. La deuxième harmonique modélise la part symétrique du mouvement d'où son appellation d'harmonique intrinsèque. La première harmonique, également appelée harmonique extrinsèque, représente quant à elle la part asymétrique du mouvement.

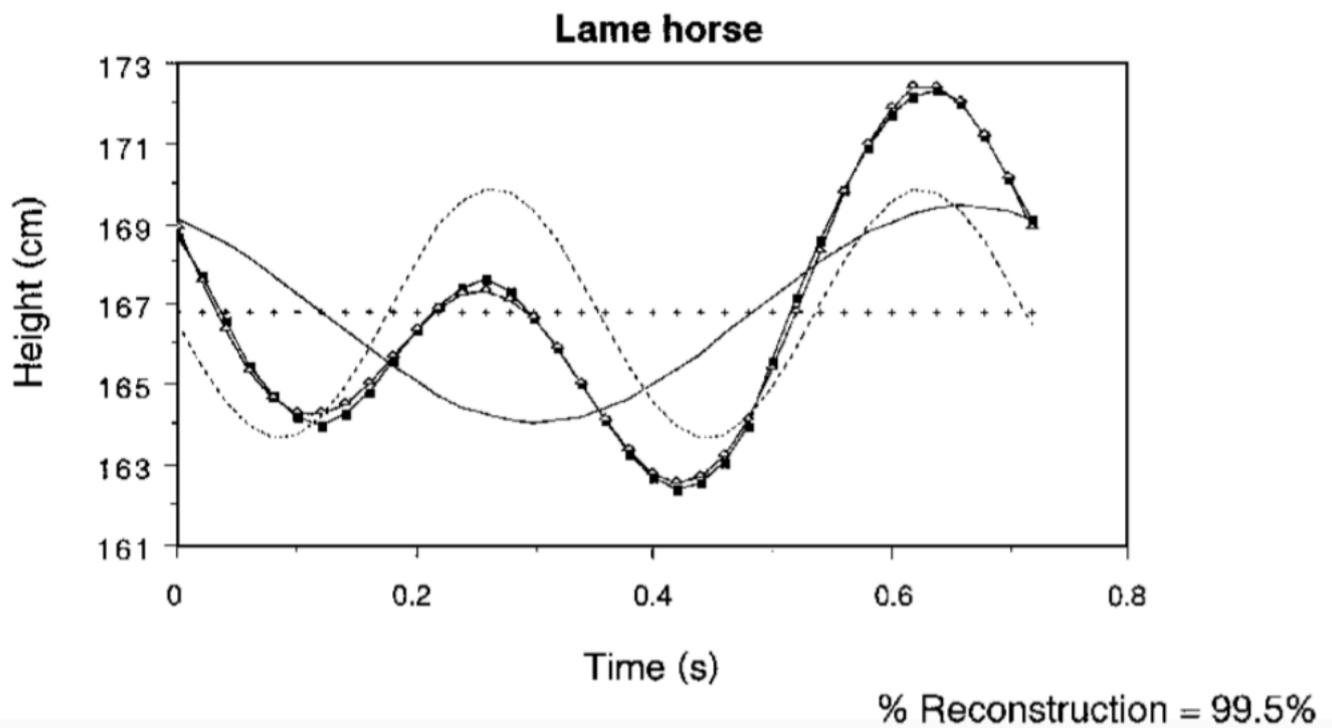
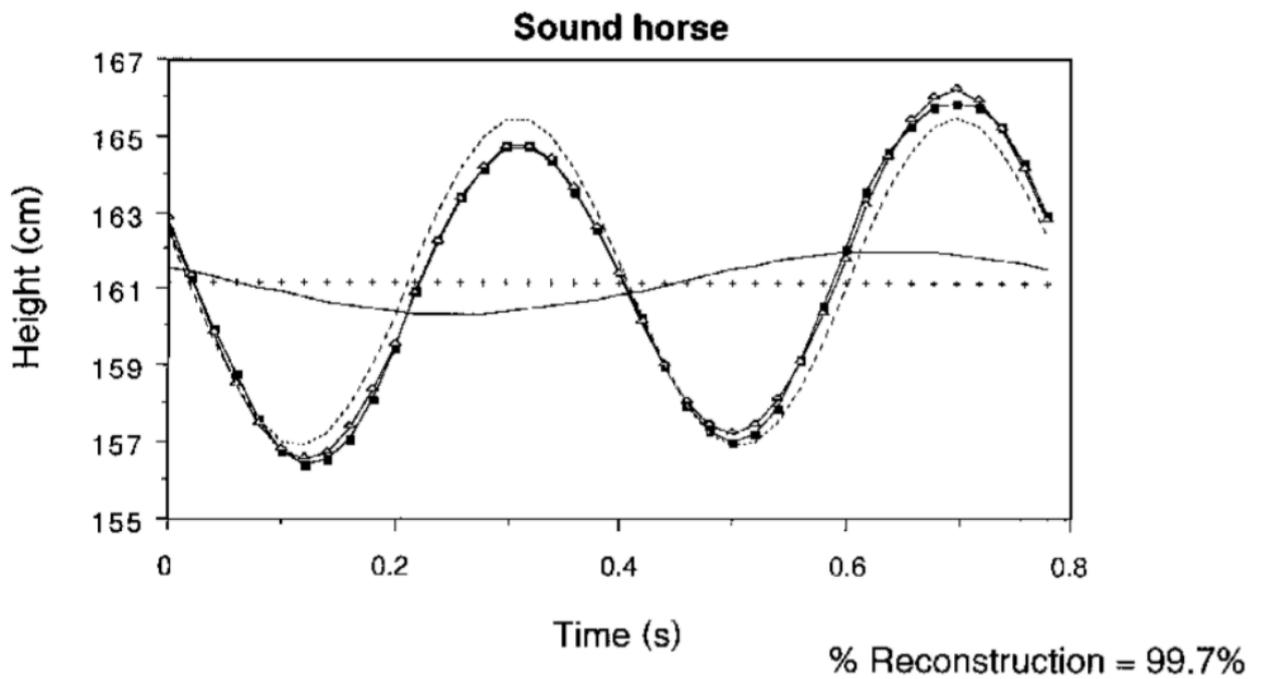


Figure 9 : A et B : Analyse des harmoniques sur une foulée de trot chez un cheval sain puis un cheval boiteux. (: Déplacement vertical expérimental ; x : A_0 valeur moyenne de déplacement ; ___ : Première harmonique ; --- : Deuxième harmonique ; . : Déplacement après combinaison de A_0 et des deux harmoniques.) (Audigé 2002)

Les représentations précédentes illustrent clairement la part de chaque harmonique dans le mouvement à partir des capteurs placés sur le tronc. La première harmonique,

d'amplitude supérieure pour un cheval boiteux que pour un cheval sain, reflète l'asymétrie du mouvement alors que la deuxième harmonique, doublée par rapport à la première représente la symétrie du mouvement du tronc et les deux phases de la foulée.

ii) Identification d'une boiterie par l'analyse de Fourier

Audigié et al. (2002) se sont ensuite intéressés à l'identification du membre boiteux en détectant tout d'abord s'il s'agissait d'une boiterie d'un membre antérieur ou d'un membre postérieur avant d'identifier si l'atteinte concernait le membre droit ou le membre gauche. Un cheval est ainsi considéré comme boiteux d'un membre antérieur si le déplacement du tronc semble altéré en région crâniale et boiteux d'un membre postérieur si c'est le déplacement de la région caudale qui est atteint. Ils ont alors défini le ratio d'énergie ER_z :

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

Ce ratio décrit la part symétrique du mouvement de la deuxième harmonique. Lorsqu'il est de 100%, le mouvement est considéré comme parfaitement symétrique et le cheval ne présente pas de boiterie.

En utilisant la position des marqueurs, les expérimentateurs ont ainsi pu démontrer qu'une boiterie d'un membre antérieur se traduit par une différence de pourcentage ER_z(T₆) - ER_z(LS) inférieure à celle d'un cheval sain. A contrario, une boiterie d'un membre postérieur se traduit par une différence de pourcentage ER_z(T₆) - ER_z(LS) supérieure à celle d'un cheval sain.

L'identification du membre boiteux est possible en calculant la différence entre les harmoniques de chacune des phases de la foulée. En effet, un cheval boiteux présente une réduction de l'appui sur le membre atteint au cours de la phase d'appui (Buchner et al. 1996).

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

$\Delta\phi$ est une valeur comprise entre -180° et +180°. En considérant que l'amplitude de propulsion du diagonal boiteux est inférieure à celle du diagonal sain, il est possible de déterminer un intervalle de $\Delta\phi$ compris entre -45° et +135° (Buchner et al. 1996). De la même façon l'amplitude de la phase d'impact du diagonal boiteux est également inférieure à celle du diagonal sain. L'intervalle de $\Delta\phi$ est alors compris entre +45° et -135°.

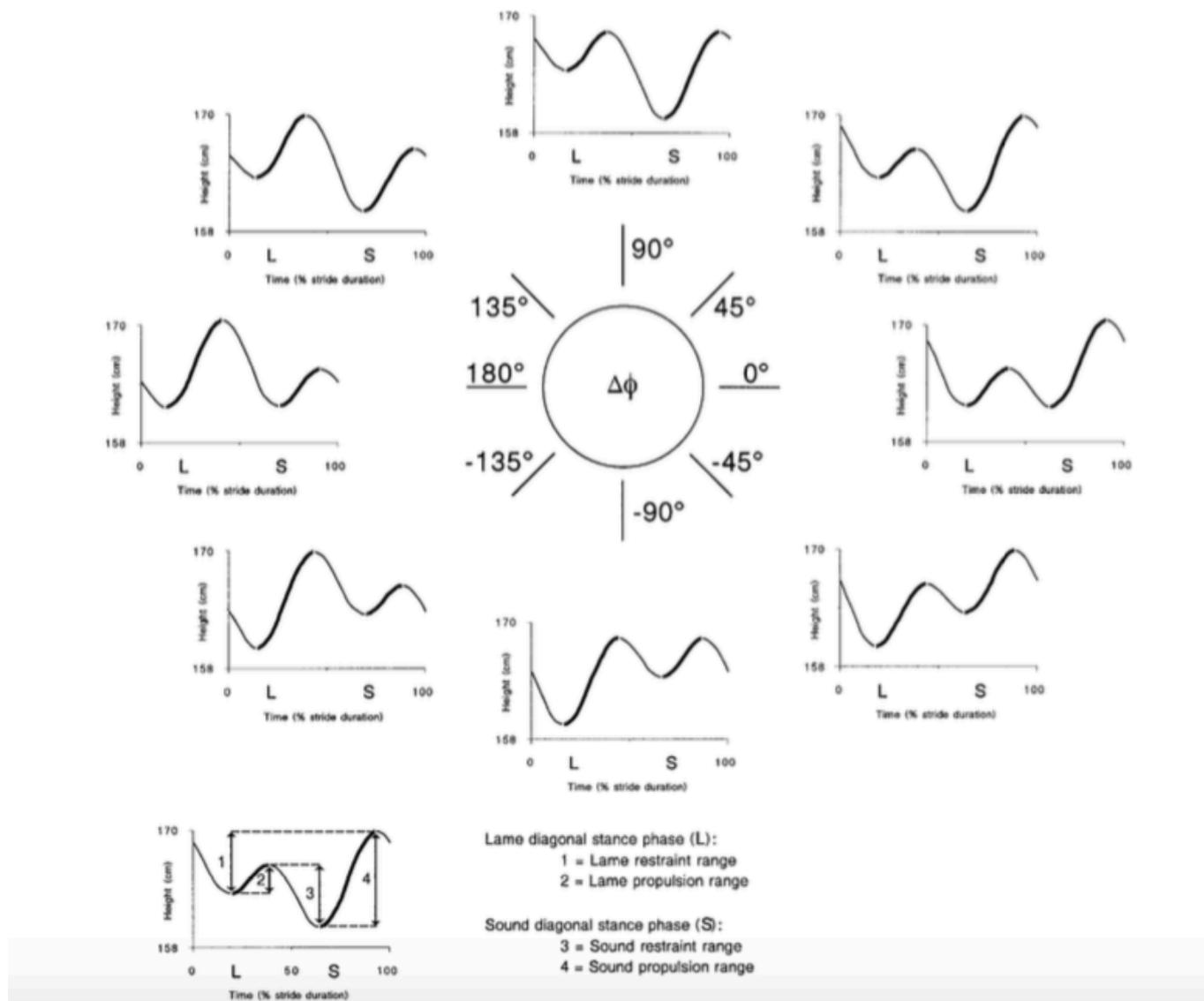


Figure 10 : Relations entre la valeur de $\Delta\phi$ et le type de boiterie présentée par le cheval (Audigié 2002)

L'évaluation de la symétrie antérieure s'effectue en analysant le déplacement vertical du marqueur en T₆ alors que la symétrie postérieure est analysée par le déplacement vertical du marqueur de la jonction lombo-sacrée LS.

Sur la figure précédente, la foulée est découpée en deux phases : une phase de rétraction et une phase de propulsion.

Au cours de la phase de rétraction, l'amplitude des mouvements correspond à la différence entre la hauteur maximale atteinte en début de phase d'appui et la hauteur minimale atteinte au milieu de la phase d'appui. Pour la phase de propulsion, l'amplitude est calculée par la différence entre la hauteur maximale atteinte après la fin de la phase d'appui et la hauteur minimale atteinte au milieu de la phase d'appui.

En considérant, d'après la figure, que l'amplitude de propulsion du diagonal boiteux est inférieure à celle du diagonal sain, il est possible de déterminer un intervalle de $\Delta\phi$ compris entre -45° et +135° (Buchner et al. 1996). De la même façon l'amplitude de la phase d'impact

du diagonal boiteux est également inférieure à celle du diagonal sain. L'intervalle de $\Delta\phi$ est alors compris entre $+45^\circ$ et -135° .

À partir de l'ensemble des informations recueillies par les données cinématiques, il est possible de créer un arbre décisionnel permettant de statuer successivement sur la symétrie globale du cheval, l'atteinte antérieure ou postérieure pour finalement déterminer le membre boiteux.

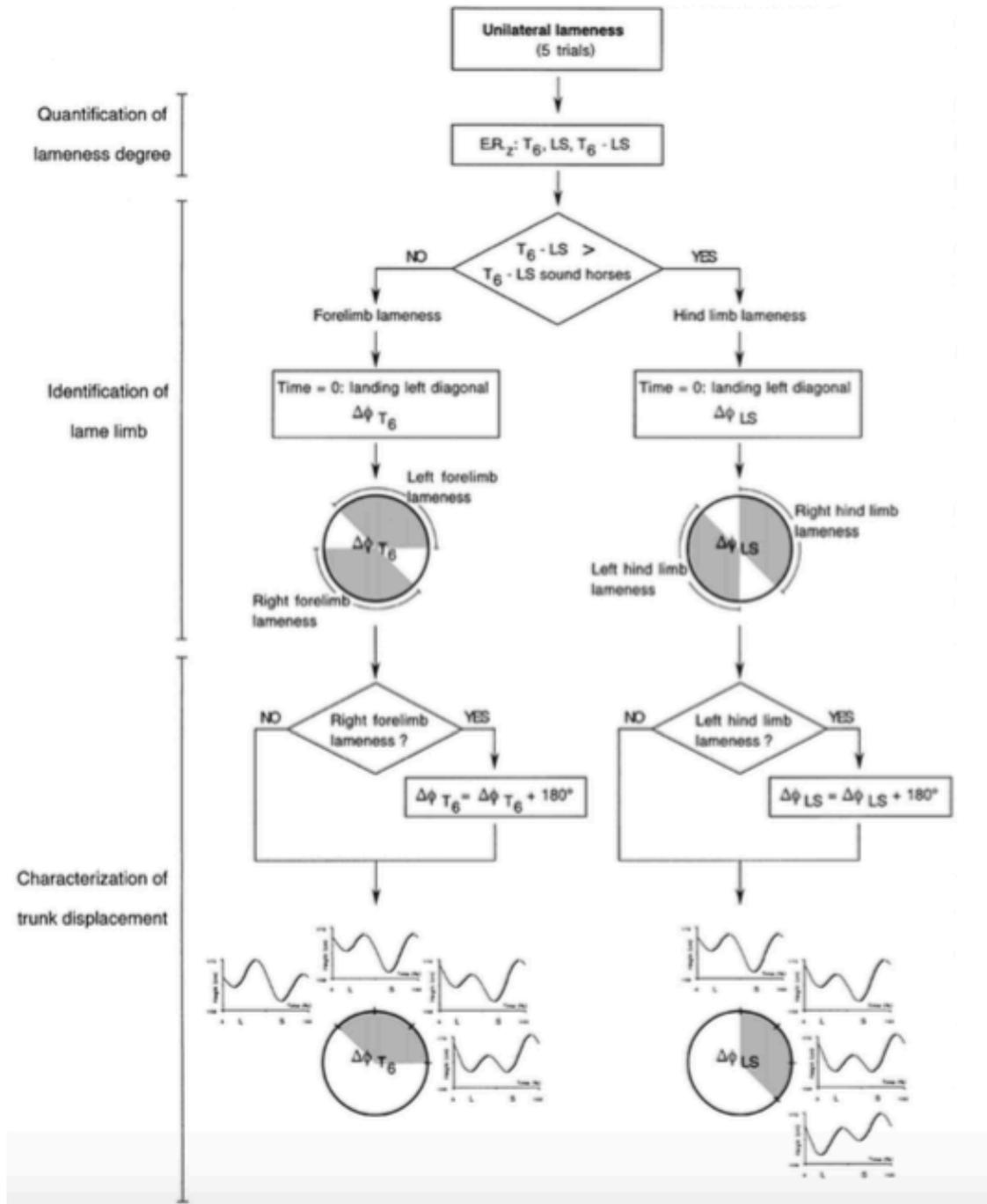


Figure 11 : Algorithme mis au point pour identifier le degré de boiterie, le membre boiteux et caractériser la boiterie. (Audigié 2002)

Cette méthode mathématique fut ainsi reprise dans plusieurs études dont celle de Kelmer et al. (2005) dans l'étude des mouvements compensatoires induits suite à la mise en place de fers instrumentés créant une boiterie artificielle chez les chevaux inclus dans le test. L'usage du nombre de marqueurs avait alors été réduit à un marqueur de tête et de croupe permettant de mesurer l'indice de symétrie globale par le déplacement vertical des marqueurs au cours du mouvement.

d) Conclusion

L'analyse cinématique du mouvement offre donc des données précieuses dans l'étude de la locomotion du cheval. Elle permet de décomposer chaque temps du mouvement et de déterminer précisément la position de chaque segment identifié par des marqueurs placés sur le corps du cheval. Il est également possible d'étudier l'évolution des angles et de la trajectoire parcourue par chaque segment ou articulations du cheval.

Comme nous venons de le voir, l'analyse cinématique décrit également la symétrie globale du cheval en mouvement et il est alors possible de détecter la présence d'une boiterie et de localiser le membre atteint.

Cependant, ces techniques restent relativement peu utilisées si ce n'est dans les grands centres de recherche sur la locomotion du cheval. En effet, le dispositif reste complexe aussi bien dans le matériel qu'il requiert que dans son utilisation. Il apparaît ainsi plus intéressant d'appliquer ces techniques lorsque la structure dispose d'un tapis roulant permettant un enregistrement d'un grand nombre de foulées et d'un local dédié à ce type d'analyse qui de plus s'avère relativement chronophage par rapport à des méthodes plus récentes d'analyse objective de la locomotion.

3) Analyse cinétique du mouvement

L'analyse cinétique du mouvement consiste à étudier les forces mises en jeu lors du mouvement du cheval. Contrairement à l'analyse cinématique précédemment décrite, il ne s'agit pas là de décrire le mouvement mais de comprendre son origine et les forces qui permettent de l'entretenir.

Plusieurs méthodes ont été mises au point pour déterminer les forces liées au mouvement : Les forces de réaction au sol ont pu être déterminées par l'utilisation de plaques de force ou de fers instrumentés ; l'utilisation d'accéléromètres mesurant l'accélération de surface des différents segments du corps offre la possibilité de calculer l'absorption des chocs par les différents segments lors de l'impact du pied et surtout de mesurer les déplacements du centre de masse (système équimétrix) ou de certaines parties du corps (tête, croupe, pontes de la hanche, Lameness Locator, autre système de Pfau..). L'électromyographie est également une des techniques récentes employée dans l'analyse cinétique du mouvement.

a) Analyse des forces de réaction au sol

Par définition, une force est un agent qui tend à causer un changement de position et de forme d'un corps si elle est supérieure à la force de gravité et la résistance du corps. Les forces sont donc responsables du mouvement de tout corps et de ses différents segments. Chacune d'entre elles peut être définie comme une quantité vectorielle et décrite par un point d'application, une amplitude et une direction. Elles sont généralement représentées dans les trois dimensions de l'espace.

Dans le cadre de l'étude du mouvement de la locomotion d'un cheval, il est possible de distinguer des forces internes au cheval (musculaires, tendineuses etc.) et des forces externes (de contact, de gravité etc.) liées à son environnement.

L'étude cinétique du mouvement repose sur les interactions entre le cheval et le sol avec lequel il entre au contact au moment de l'impact de ses pieds. Selon la troisième loi de Newton, à toute action correspond une réaction égale et opposée. Ainsi, lorsque le cheval produit une force d'action sur le sol lors de l'impact, il reçoit en échange une force de réaction au sol (GRF ou Ground Reaction Force). Cette dernière force s'avère particulièrement intéressante dans l'analyse du mouvement puisqu'elle permet de connaître la force à laquelle sont soumis les différents segments du membre du cheval et d'en déduire les conséquences biomécaniques d'impacts répétés sur le système locomoteur.

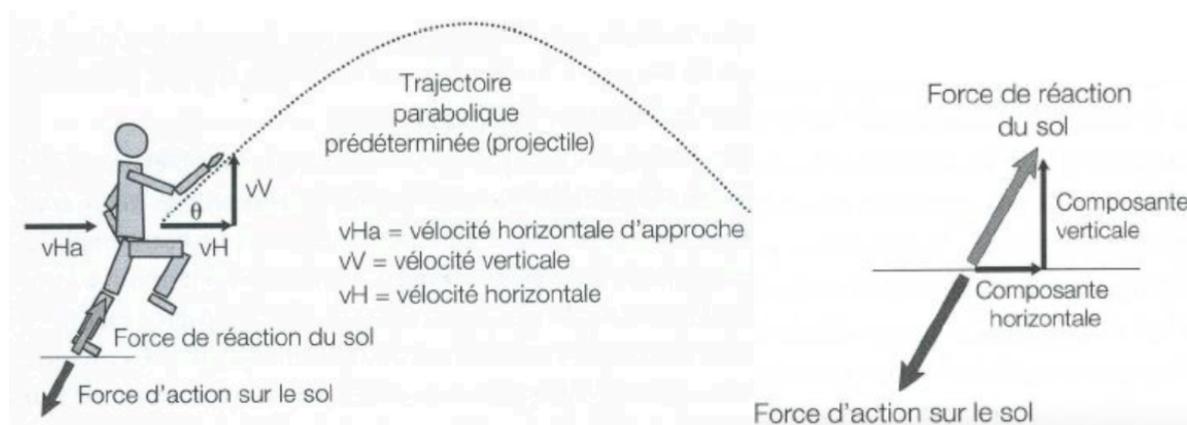


Figure 12 : Représentation des composantes de la force de réaction au sol (Ground Reaction Force)

i) Plateforme de force

Les plateformes de force sont des outils utilisés dans les principaux centres de recherche sur la locomotion. Au départ dédiées à la médecine humaine, leur utilisation s'est ensuite vue démocratisée en médecine équine. Ces dispositifs permettent d'enregistrer des données mécaniques puis de les transformer en données électriques par l'intermédiaire de capteurs de force ou de jauges de contraintes.

Jauge de contrainte :

Une jauge de contrainte est constituée d'un fil électrique fin, replié en lignes parallèles et collé sur une feuille de très fine épaisseur. Chaque portion de fil est alignée dans une même direction. Ce fil est relié à ses deux extrémités à deux fils plus épais qui assurent la transmission des informations.

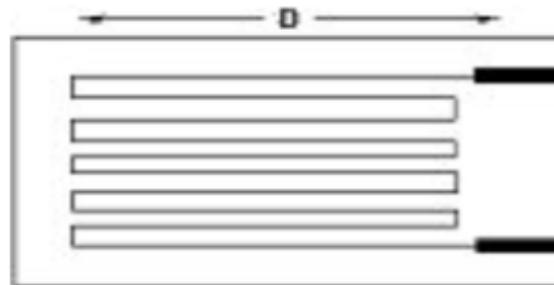


Figure 13 : Modélisation d'une jauge de contrainte (Hertogh 2013)

Lorsqu'une jauge est soumise à une contrainte mécanique, il est admis que le fil subit un allongement mécanique et une réduction de sa section.

$$R = \frac{p \times l}{s}$$

Pour laquelle R = résistance, p = résistivité, l = longueur, s = section

L'équation précédente permet de relier la résistance de la jauge à la longueur et la section du fil. Lors d'une contrainte mécanique provoquant un allongement du fil, une augmentation de la résistance est enregistrée sous forme de donnée électrique et transmise au centre de contrôle.

Cette jauge peut être directement placée sur le corps ou disposée dans un "corps d'épreuve" dont les transformations mécaniques sous l'effet d'une force sont transmises à la jauge.

Les jauges sont relativement peu sensibles c'est pourquoi leur utilisation reste limitée à l'heure actuelle.

Capteurs de force :

Les capteurs de force reposent sur les propriétés électriques particulières des cristaux piézo-électriques. Un cristal est organisé en un ensemble d'anions et de cations dont les charges s'égalisent parfaitement et créent une structure électriquement stable. Lorsque ce cristal est soumis à une contrainte ou une force mécanique, il se déforme de façon infinitésimale et désorganise la géométrie des réseaux électriques. Il se crée alors une charge électrique globale à la surface du réseau qui peut ensuite être amplifiée.

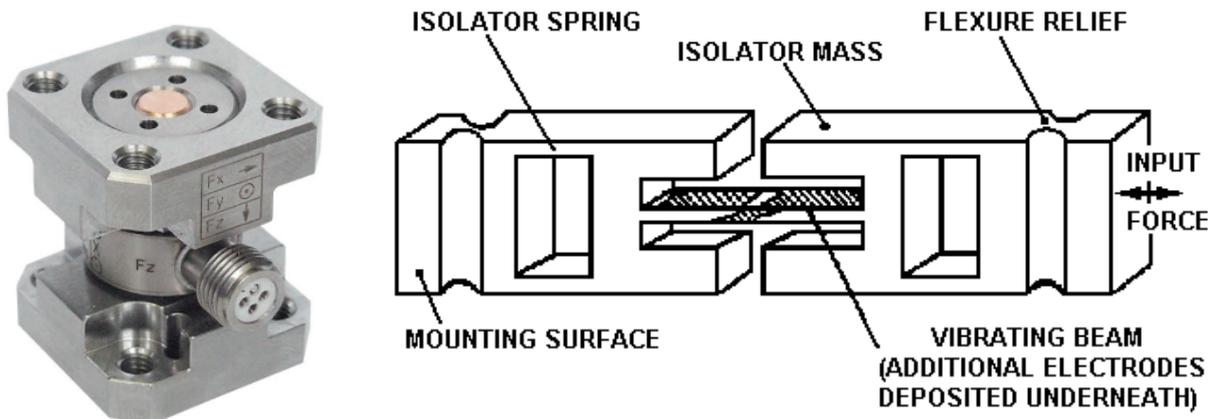


Figure 14 : A : Capteur piézoélectrique ; B : Représentation schématique d'un capteur de force (Hackert et Herbain 2015)

La mesure de cette charge globale est proportionnelle à l'intensité de la contrainte à laquelle le cristal a été soumis.

Contrairement à la jauge de contrainte, les capteurs piézoélectriques offrent une très bonne sensibilité et une information bien plus précise de par leur grande réactivité. Toutefois, ces capteurs sont relativement sensibles aux changements de température et d'humidité ; le choix des conditions de mesure est donc primordial.

Plateforme de force :

Une plateforme de force (ou plateforme dynamométrique) est constituée de deux plaques métalliques entre lesquelles sont placés quatre capteurs ou jauges de contrainte à chacun des coins des plaques. La plaque supérieure sur laquelle le cheval réceptrice est généralement revêtue d'un tapis antidérapant pour éviter les risques de glissades.

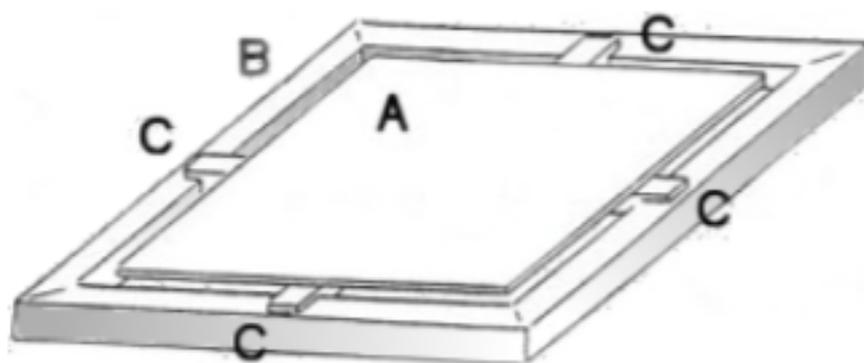


Figure 15 : Modélisation d'une plateforme de force (Hertogh 2013) A : Plateau antidérapant, B : Cadre, C : Positionnement des capteurs

La plaque transmet sans retard ni atténuation les forces aux capteurs qui transforment la déformation mécanique en information électrique. Cette dernière est ensuite amplifiée et rendue interprétable pour le clinicien.

Les plateformes dynamométriques se sont révélées relativement intéressantes dans l'étude des forces et des contraintes sur les structures osseuses et tendineuses lors de la pratique du saut d'obstacle.

Merkens et al. (1991) ont ainsi réalisé différentes mesures sur les forces appliquées sur les membres de 5 chevaux lors de la propulsion précédant un saut de 80cm et lors de la réception. Ces tests ont été réalisés grâce à une plateforme dynamométrique équipée de capteurs piézoélectriques et sous contrôle vidéo afin de vérifier l'impact du pied sur la plaque. Il apparaît que l'antérieur directeur présente un temps de contact avec le sol supérieur à celui de l'antérieur contacteur et que les forces mises en jeu sont largement supérieures lors d'un saut en comparaison à une foulée de galop sur sol plat.

Une étude de Meershoeck et al. (2001) a également démontré l'intérêt des plateformes dynamométriques grâce à des tests in vitro permettant de déterminer les forces auxquelles sont soumis les tendons fléchisseurs superficiels, profonds et ligaments suspenseurs du boulet lors d'un saut. Il a été montré que les tendons fléchisseurs superficiels et les ligaments suspenseurs du boulets sont soumis à des forces largement supérieures à celles reçues par les tendons fléchisseurs profonds, pouvant ainsi être mis en lien avec une prévalence de lésions supérieures sur ces deux premières structures chez les sauteurs. Par ailleurs, les forces exercées sur le tendon fléchisseur superficiel sont d'autant plus élevées que la hauteur du saut est importante. La prévalence des lésions est ainsi plus élevée sur le tendon fléchisseur superficiel et le ligament suspenseur du boulet en région métacarpienne alors que les atteintes du tendon fléchisseurs profonds se produisent préférentiellement dans la région du pied.

Cependant, ce type de dispositif ne permet souvent que l'étude de la locomotion d'un seul membre et non d'une foulée complète au vu de la taille réduite de la plaque (souvent inférieure à 0,5m²). Il nécessite également un contrôle visuel à chaque mesure afin de s'assurer du bon poser du membre du cheval au centre de la plaque lors de l'enregistrement. Les plateformes de forces restent donc généralement limitées à des études précises sur la locomotion du cheval et non à un diagnostic de terrain.

ii) Fers instrumentés

Les fers instrumentés (ou fers dynamométriques) sont des fers équipés de deux plaques protégeant des capteurs de fine épaisseur. Le principe d'enregistrement de données est relativement similaire à celui d'une plateforme de force : des jauges de contraintes ou des capteurs piézoélectriques mesurent une déformation mécanique et transforment les données en information électrique.



Figure 16 : Disposition des capteurs de force intégrés au fer instrumenté ; B : Disposition des fers instrumentés et des branchements de capteurs sur le pied du cheval. (Back and Clayton 2001)

Ils présentent l'avantage d'étudier un grand nombre de foulées et de déterminer les forces sur plusieurs membres au cours d'un même enregistrement. Contrairement aux plateformes de forces, ces fers offrent la possibilité d'étudier les variations de réaction de force au sol sur différents types de sols et de supports.

Cependant, les fers instrumentés restent tout de même compliqués à utiliser sur le terrain car ils nécessitent un équipement particulier pour ferrer et déferrer correctement le cheval lors de l'enregistrement. D'autre part, le poids et l'épaisseur relativement importants par rapport à un fer classique pourrait induire un biais de mesure lors de l'impact du pied au sol. L'un des premiers fers instrumentés mis au point en 1958 par Björk pesait 1800g tandis que celui utilisé dans l'étude de Hjertén et al. (1987) pesait 2300g. Il paraît ainsi largement probable que le poids des fers influe sur la locomotion du cheval. Des fers plus récents pesant 200 à 300g ont été mis au point par Roepstorff et al. (1993) mais présentaient alors une sensibilité moindre. A l'heure actuelle, aucun fer instrumentalisé n'est commercialisé sur le marché vétérinaire.

iii) Tapis roulants instrumentés

Le tapis roulant instrumenté est un dispositif récent composé d'un tapis roulant sous lequel est disposée une plateforme de force. Le tapis instrumenté permet de mesurer les forces de réaction au sol simultanément sur les quatre membres du cheval sur un nombre illimité de foulées. Il offre la possibilité d'enregistrer un grand nombre de foulées tout en s'affranchissant de la mise en place de fers instrumentés et du contrôle visuel nécessaire lors de l'utilisation d'une plateforme de force.

Weishaupt et al. (2002) ont mené une étude sur l'utilisation du tapis roulant instrumenté : Ils ont comparé les forces de réaction au sol obtenues à partir du tapis à celles obtenues grâce à des fers instrumentés. Le tapis instrumenté utilisé est composé de 18 capteurs piézoélectriques mesurant la force de réaction au sol sur les quatre membres du cheval simultanément. Ils ont ainsi pu montrer une faible déviation des forces mesurées (< 1,4%) et une excellente corrélation des données ($r > \text{ou} = 0,998$).

Ce type d'outil fournit donc une information précise sur les quatre membres et sur un nombre de foulées bien plus important qu'une plateforme de force classique. Il reste toutefois peu accessible au vu de son coût et de la nécessité d'adapter les chevaux à l'exercice sur tapis roulant avant la réalisation des enregistrements.

b) Électromyographie

Si les techniques précédemment décrites s'intéressent essentiellement à la mobilisation des os et des articulations, il est important de ne pas oublier que la composante musculaire joue également un rôle fondamental dans la locomotion du cheval. L'électromyographie est une technique permettant de mesurer l'activité électrique des muscles. En effet, chaque contraction musculaire est précédée d'un signal électrique. On distingue différents types d'électrodes mesurant l'activité électrique du muscle :

- Les électrodes de surface, peu invasives, mesurent un courant électrique global à un ensemble de muscles peu profonds d'une région donnée. Comme pour un électrocardiogramme, il est nécessaire de mettre en place une dérivation tripolaire : deux électrodes sont collées à proximité du muscle tandis que la dernière est placée sur un point neutre (souvent un relief osseux).
- Certaines électrodes peuvent être insérées dans le muscle. Elles sont légèrement plus invasives mais permettent de cibler un territoire musculaire beaucoup plus restreint et offrent une meilleure précision sur la mesure de l'amplitude du signal électrique.
- L'étude de la contraction des muscles profonds est rendue possible par un abord chirurgical avec pose d'électrodes en profondeur. Cette méthode s'avère très invasive et son utilisation reste marginale.

Les informations détectées par les électrodes sont ensuite amplifiées, filtrées et retranscrites sous la forme d'un électromyogramme.

L'amplitude des signaux est relativement variable en fonction du type d'électrodes utilisées, du muscle étudié et du contact entre les électrodes et la surface musculaire. Toutefois, elle semble varier surtout en fonction du travail musculaire demandé ce qui en fait un bon indicateur de la contraction musculaire.

L'usage de l'électromyographie dans l'étude de la locomotion peut s'avérer utile à condition qu'elle soit couplée à des méthodes de cinématiques ou d'accélérométries qui permettront de mettre en relation l'activité électrique d'un muscle avec son intervention biomécanique dans le mouvement.

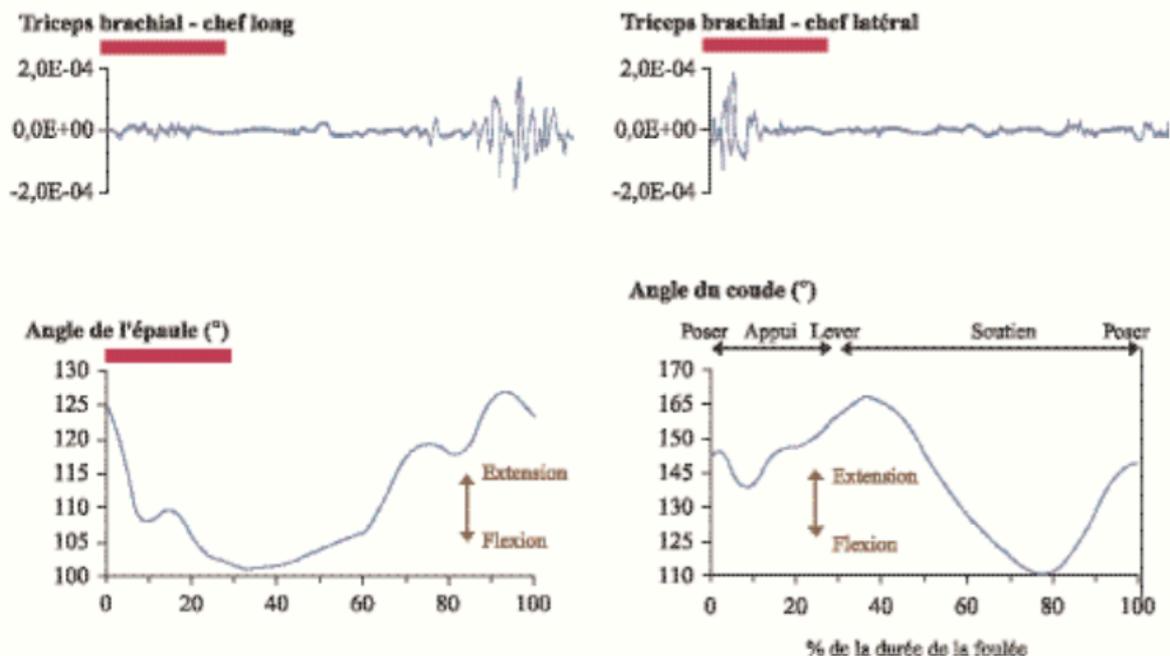


Figure 17 : Électromyogramme des chefs long et latéral du triceps brachial et évolution des angles articulaires des articulations de l'épaule et du coude au cours d'une foulée (Robert 2003)

Dans l'exemple précédent, les données cinématiques permettent de connaître avec précision les mouvements opérés par les articulations du coude et de l'épaule et de les relier à l'activité électrique du chef long et latéral du triceps brachial. Ainsi, le chef long du triceps brachial présente une activité électrique maximale précédant le poser du membre et s'atténuant jusqu'à disparaître au milieu de la phase d'appui. Cette activité électrique participe à la flexion de l'épaule et l'extension du coude. Au contraire, le chef latéral du triceps brachial présente une activité électrique n'existant que lors de l'appui du membre au sol. Il intervient ainsi en renfort du muscle précédent lorsque le coude commence à se fléchir. Il apparaît donc intéressant d'explorer le rôle de chacune des structures biologiques responsables du soutien ou du mouvement au travers de techniques biomécaniques variées et dont les informations croisées améliorent les connaissances en locomotion du cheval.

B. APPROCHE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA LOCOMOTION SUR LE TERRAIN ET PRÉSENTATION DE L'EQUINE LAMENESS LOCATOR®

1) Cahier des charges d'une évaluation objective de la locomotion sur le terrain

La mise en place de mesures objectives sur des trotteurs attelés en piste doit permettre d'obtenir des données d'accélérométrie fiables et répétables entre les différentes évaluations. Pour ce faire, il est nécessaire d'adapter le dispositif de mesure afin de le rendre utilisable en conditions de terrain.

Le système, appliqué en condition d'exercice des trotteurs, doit :

- Être facilement et rapidement mis en place afin de pouvoir être appliqué sur le terrain.
- Être adapté pour une étude sur des chevaux à grande vitesse et équipés d'un sulky.

Concernant la réalisation des mesures et l'interprétation des résultats :

- Le système doit permettre d'obtenir des résultats rapidement après l'enregistrement
- Les résultats doivent être facilement interprétables et doivent indiquer le membre boiteux et le degré de symétrie.
- Les mesures doivent être fiables et répétables
- La méthode doit être la plus sensible possible et doit se référer à un indicateur de symétrie clairement identifié.
- Les résultats ne doivent pas être influencés par de faibles variations liées aux conditions de l'exercice et n'ayant pas de lien avec la locomotion du cheval.

2) Analyse de données accélérométriques

L'ensemble des techniques d'analyse objective de la locomotion étudiées plus tôt s'appliquent relativement peu à des conditions habituelles de terrain. L'usage de plateformes de force et de tapis roulants reste réservé à certaines cliniques spécialisées dans la locomotion du cheval et nécessitent de déployer des efforts humains et matériels importants. A partir des années 1990, les connaissances en accélérométrie ont permis leur application dans la médecine vétérinaire équine.

L'accélérométrie est une technique consistant à déterminer des variations de vitesse linéaire dans le temps grâce à des capteurs dits accéléromètres fixés à des segments du corps du cheval. Les accéléromètres mesurent instantanément tout changement de vitesse au cours d'un intervalle de temps déterminé par l'enregistrement. L'accélération mesurée est proportionnelle à la force à laquelle le segment étudié est soumis.

L'usage d'accéléromètres s'avère particulièrement intéressant sur le terrain : les capteurs de petite taille, rapidement mis en place sur le cheval offrent une information fiable sur la symétrie du cheval et les caractéristiques du mouvement. Ils ne nécessitent qu'un matériel restreint et les logiciels informatiques transformant les données brutes ont été

conçus de sorte à être facilement utilisables par des praticiens. Toutefois, la position des capteurs reste la principale limite puisque seuls les segments équipés d'un capteur peuvent être étudiés.

Plusieurs systèmes d'accélérométrie ont pu être développés et commercialisés. L'Equimétrie par exemple est un dispositif d'accélérométrie constitué d'une ceinture, placée sur le sternum du cheval et équipée de deux accéléromètres mesurant le déplacement du cheval selon les axes longitudinal et dorso-ventral. Plusieurs études menées par Barrey et al. (1996, 1999) ont permis d'appliquer les données d'accélérométrie à la détection du membre boiteux et la quantification d'une boiterie. Il apparaît cependant que l'Equimétrie fournit des données relativement fiables pour des boiteries antérieures mais d'une moindre précision pour les boiteries postérieures (Barrey et al. 1999). Une étude de Buchner et al. (1993) a ainsi démontré qu'un capteur placé sur le sacrum facilite la détection de boiteries postérieures.

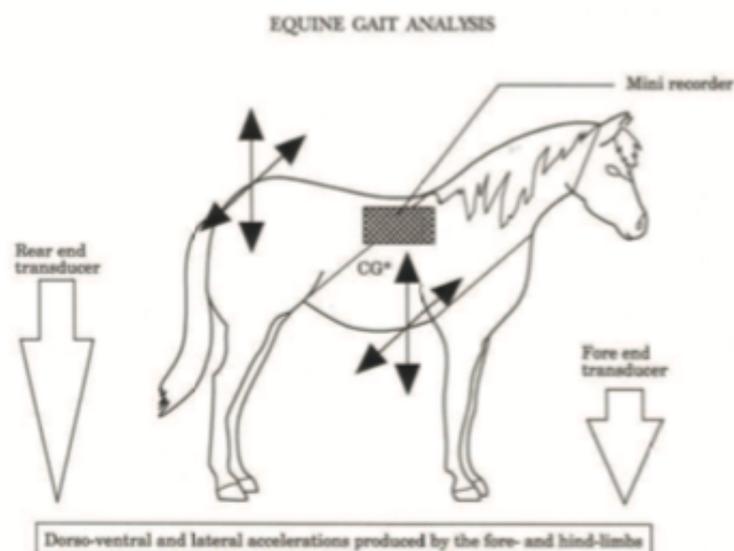


Figure 18 : Emplacement des accéléromètres du système Equimétrie couplé à un accéléromètre placé sur le sacrum (Barrey 1999)

Plusieurs études ont également été menées en plaçant des accéléromètres sur les sabots des chevaux afin de cibler aussi précisément que possible l'instant où le pied rentre en contact avec le sol ou s'en éloigne.

Lanovaz et al. (1998) a étudié l'atténuation des impacts du pied du cheval au sol par des expériences in vitro. Des pieds de chevaux sont équipés de quatre accéléromètres et soumis à un impact à vitesse croissante entre les différents tests.

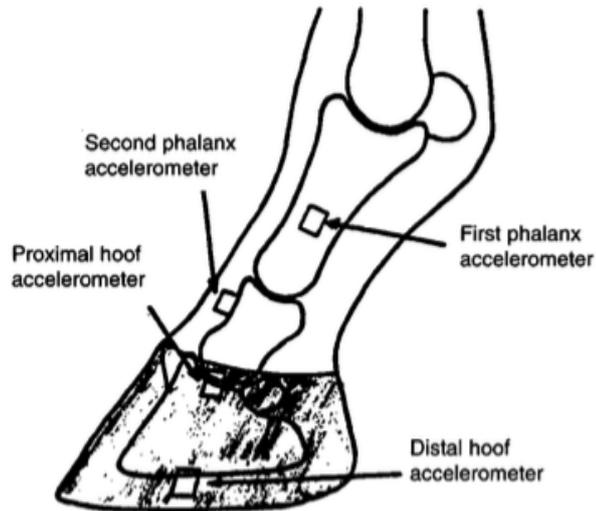


Figure 19 : Positionnement des accéléromètres sur les parties distales du pied du cheval (Lanova 1998)

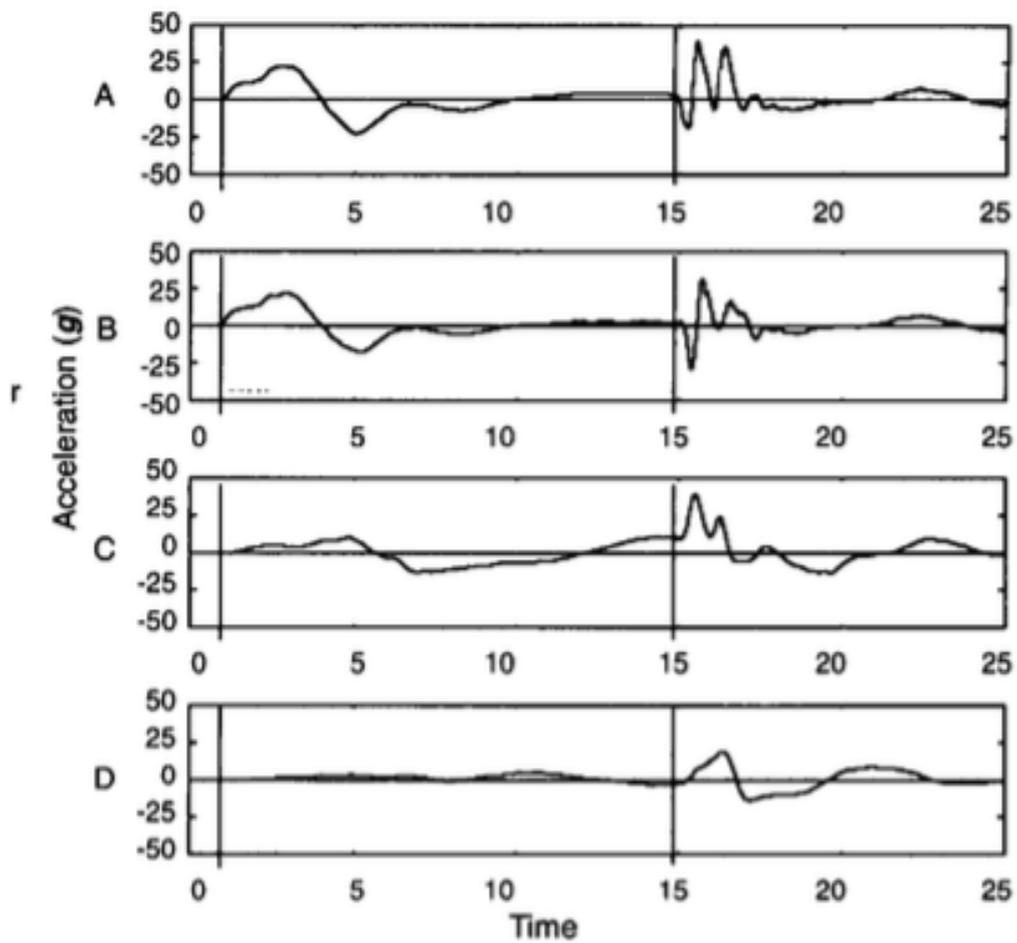


Figure 20 : Signaux obtenus par les quatre accéléromètres précédemment décrits : A : Accéléromètre de la partie distale du sabot, B : Accéléromètre de la partie proximale du sabot, C : Accéléromètre de la 2ème phalange, D : Accéléromètre de la 1ère phalange (Lanova 1998)

Bien que ces tests s'éloignent du contexte in vivo où le système sanguin et les tendons participent à une meilleure répartition des forces et une bonne orientation des structures osseuses lors des impacts du pied, ils permettent toutefois de montrer que l'absorption d'énergie se fait essentiellement au niveau de la jonction entre la première et la deuxième phalange. La position des accéléromètres sur les différentes régions du sabot ont permis de montrer dans cette même étude que la région du talon semble être la plus déformable et la plus apte à absorber la majeure partie de l'énergie d'impact contrairement aux parois latérales du sabot.

Ces tests s'avèrent donc particulièrement intéressants pour définir les forces auxquelles le pied du cheval est soumis et le degré de lésions osseuses et tendineuses pouvant être lié à des impacts réguliers.

Les systèmes d'accélérométrie ont été aussi particulièrement utilisés pour des détections de boiteries mais également pour définir le potentiel sportif de jeunes chevaux à partir de certaines caractéristiques de foulée.

Les premières études ont été réalisées sur des chevaux de course du fait de l'importance économique à définir leurs capacités au plus tôt et la facilité à mettre en œuvre des tests de terrain répétables. Les études de Barrey et al. (1994 et 1995) ont ainsi défini un ensemble de paramètres calculés à partir de données d'accélérométrie : longueur, fréquence de la foulée, magnitude d'accélération-décélération, régularité et symétrie de la foulée. En comparant ces paramètres entre des groupes de chevaux plus ou moins expérimentés, il a été possible de conclure que les chevaux à hautes aptitudes en course présentent une longueur et une fréquence de foulée plus importante. De même, la magnitude accélération-décélération est plus basse chez ces chevaux, indiquant une meilleure efficacité de la locomotion. Ces données s'avèrent particulièrement intéressantes pour prédire le potentiel sportif de ces jeunes chevaux et de détecter précocement une atteinte orthopédique.

Une étude de Barrey et Galloux (1997) s'est intéressée à comparer les caractéristiques de foulée et de saut chez des chevaux d'obstacles à partir de l'utilisation d'un dispositif d'accélérométrie (Equimérix). Deux groupes de chevaux (bons et mauvais sauteurs) sont établis en fonction de leur niveau ISO et évalués sur des profils et des hauteurs d'obstacles différents. Ils ont ainsi montré que les chevaux ayant de mauvaises aptitudes à l'obstacle présentent une plus faible fréquence de foulée et un ratio d'accélération antérieurs/postérieurs plus fort que chez les bons sauteurs. Ces résultats montrent que les fautes commises par les moins bons chevaux sont liées à une production d'énergie insuffisante, un manque d'accélération en zone d'abord et un manque d'engagement des postérieurs lors de la foulée précédant le saut.

L'utilisation de l'accélérométrie peut également s'appliquer dans l'étude des aptitudes des jeunes chevaux de dressage. Une étude de Barrey et al. (2002) a comparé les aptitudes au dressage chez trois races de chevaux différentes à partir de données de conformation et d'accélérométrie (Equimérix). Les chevaux de race espagnole et allemande présentent une propulsion plus importante que les chevaux de race française. Cependant, les résultats ont indiqué un manque de régularité et de symétrie chez les chevaux espagnols en comparaison

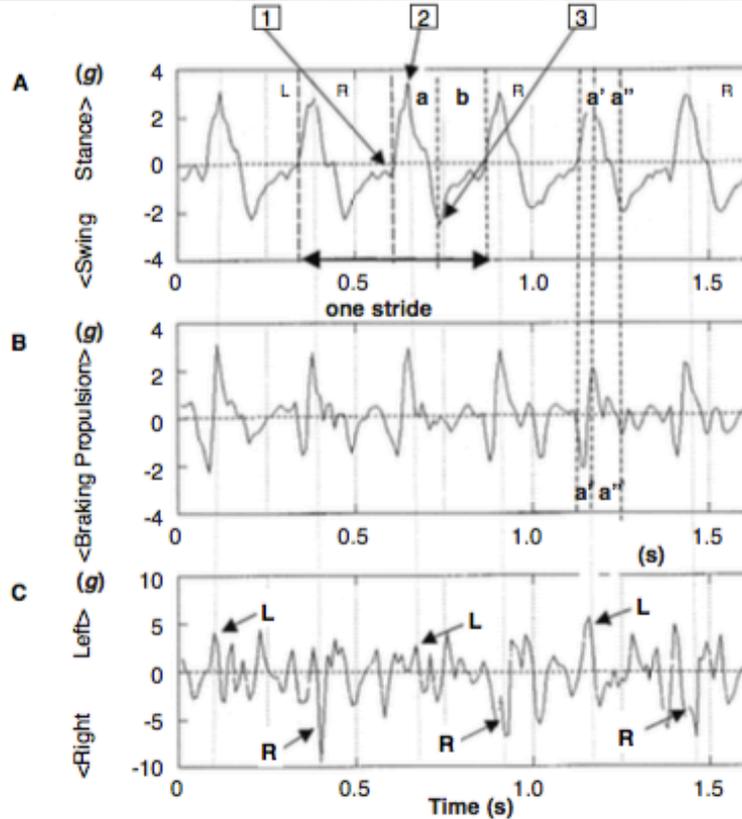
des deux autres races pouvant être liés à une mise à l'entraînement plus tardive chez ces chevaux. Au contraire, les chevaux allemands présentent une excellente symétrie, régularité et propulsion au trot.

L'ensemble de ces études montrent que les analyses de données accélérométriques sont particulièrement adaptées à définir au plus tôt les aptitudes des jeunes chevaux à la pratique de la discipline à laquelle ils sont destinés. Il est alors important de définir les caractéristiques de foulée à étudier en fonction des résultats attendus.

3) Comparaison des méthodes d'analyse cinématique et accélérométrique du mouvement

L'analyse cinématique permet de décrire le mouvement par l'utilisation de systèmes d'enregistrements vidéo. De la même façon, l'analyse accélérométrique fournit des données sur les caractéristiques des foulées par le biais des accéléromètres.

Une étude de Leleu et al. (2002) a comparé ces deux méthodes d'enregistrement en équipant 3 trotteurs du système « Equimérix » et de capteurs sur les antérieurs et les postérieurs. Les enregistrements sont effectués sur 40m à 5 vitesses croissantes et les chevaux sont filmés sur leur côté gauche.



A = Dorsoventral acceleration curve	a = Stance phase
B = Longitudinal acceleration curve	a' = Braking phase
C = Lateral acceleration curve	a'' = Propulsion phase
1 = Hoof impact	b = Swing phase
2 = Midstance	L = Left diagonal
3 = Hoof lift-off	R = Right diagonal

Figure 21 : Comparaison des données obtenues entre les méthodes cinématique et accélérométrique. (Leleu 2002)

Les marqueurs placés sur les membres du cheval permettent de calculer la durée et la fréquence de foulée. Il est également possible de déterminer la durée des phases d'appui et de suspension de chaque diagonal. L'accélérométrie fournit également des valeurs de régularité, de symétrie et d'énergie et de durée précise séparant chaque phase de la foulée. Cette comparaison reflète une très bonne corrélation entre les deux méthodes d'enregistrement. Toutefois, le système d'enregistrement vidéo s'avère moins précis dans la détection du moment exact où le pied du cheval quitte le sol. La précision des durées de phases de propulsion et de freinage est moindre que celle obtenue grâce aux données accélérométriques. Dans le cadre de ces tests, les accéléromètres sont placés sur le sternum du cheval ce qui ne permet donc pas d'évaluer le fonctionnement des membres et des articulations contrairement aux enregistrements vidéo.

Une autre étude de Keegan et al. (2004) a réalisé également une comparaison entre ces deux méthodes sur 8 chevaux dont une boiterie a été induite par des fers spéciaux. Les chevaux étaient équipés de 5 accéléromètres (tête, sacrum, dos, antérieur droit et postérieur droit) et de 4 marqueurs pour l'analyse vidéo. Les tests ont été réalisés sur un tapis roulant avec des enregistrements sur 80 à 100 foulées. Là encore, la corrélation des résultats entre les deux dispositifs est relativement bonne. La multiplicité des capteurs complique la mise en place du système dans un cadre d'examen orthopédique classique mais reste tout de même plus simple d'utilisation que les méthodes cinématiques.

L'utilisation de l'accélérométrie offre donc une précision de mesures comparable à celle des méthodes cinématiques. De plus, la mise en place des accéléromètres et la lecture des données restent relativement accessibles sur le terrain. Il s'agit donc d'une méthode de mesure objective de la locomotion intéressante à développer dans le cadre d'examens locomoteurs afin de s'affranchir des variations possibles d'une analyse subjective.

4) L'Équine Lameness Locator[®] : une méthode d'accélérométrie par capteurs inertiels

a) Principe de fonctionnement du Lameness Locator[®]

Nous étudions ici le fonctionnement du Lameness Locator, un système d'accélérométrie reposant sur un enregistrement de données cinétiques obtenues grâce à des capteurs inertiels placés sur le corps du cheval. Ces données sont ensuite transmises à une tablette intégrant les informations reçues et les transformant sous forme de graphiques rapidement interprétables par le vétérinaire de terrain.

Le Lameness Locator est un dispositif créé par l'entreprise Equinosis et ayant vu le jour grâce à un partenariat de vétérinaires et d'ingénieurs de l'Université du Missouri et de l'Institut des Technologie d'Hiroshima au Japon. Conçu dans la même verve que le système Equimétrie, il est à destination des vétérinaires de terrain dans le cadre de leurs consultations orthopédiques. Actuellement commercialisé au Missouri et en Colombie, plusieurs cliniques européennes ont fait le choix d'investir dans ce dispositif afin d'offrir un diagnostic précis et objectif des affections à leurs patients.

b) Équipement composant le dispositif

i) Les capteurs

Le Lameness Locator se compose de 3 capteurs : 2 accéléromètres unidirectionnels placés sur la nuque et au sommet de la croupe et un gyroscope placé sur l'antérieur droit. Chaque capteur mesure 4cm par 3 cm par 2cm et pèse moins de 30g. Une image sur le sommet du capteur indique l'endroit et le sens dans lequel il doit être placé sur le cheval. Deux voyants sont présents sur l'une des faces latérales du capteur et indiquent le niveau de charge ou de fonctionnement. Ces capteurs sont donc conçus de sorte à ne pas modifier la locomotion du cheval.

Chacun de ces capteurs fonctionne sur batterie et doit être rechargé entre chaque utilisation. Avant chaque enregistrement, les capteurs doivent être activés par le biais d'un aimant pour qu'ils puissent être détectés par la console d'enregistrement.

Le capteur de tête :

Le capteur de tête est un accéléromètre mesurant l'accélération vertical de la tête au cours du mouvement.

Le capteur de tête est placé au niveau de la nuque, entre les deux oreilles. Il est fixé grâce à un protège-nuque placé sur la tête du cheval équipé d'une bande auto-agrippante permettant de fixer le capteur. Celui-ci est placé de sorte à ce que le schéma soit dorsal et les diodes orientées sur le côté droit du cheval.



Figure 22 : Mise en place du capteur de tête (CHVE Livet)

Le capteur doit être correctement fixé de sorte à ce qu'il ne puisse pas bouger au cours des mesures. Une mauvaise position pourrait engendrer une modification des mesures et donc une mauvaise interprétation.

Le capteur d'antérieur :

Le capteur placé sur l'antérieur droit est un gyroscope qui mesure la vitesse angulaire du membre thoracique droit.

Le capteur d'antérieur doit être placé sur la partie dorsale du paturon de l'antérieur droit. Il est fixé par le biais d'une bande de feutre prévue à cet effet par le constructeur et muni d'une poche cousue permettant de loger et de fixer le capteur. Ce dernier doit être placé selon le schéma : l'image est placée est face dorsale et les diodes électroluminescentes sont orientées vers la droite de l'animal.



Figure 23 : Mise en place du capteur de l'antérieur droit (CHVE Livet)

La bande de feutre doit être correctement enroulée autour du membre du cheval et solidement fixée de sorte à ce que le capteur ne puisse pas bouger lors des mesures. Le Lameness Locator n'étant pas conçu à la base pour des examens à grande vitesse sur des trotteurs, il a été nécessaire d'adapter la fixation du capteur en le protégeant par une bande V-trap. Cette modification ne modifie ni la position du capteur ni l'enregistrement des mesures. Une mauvaise fixation peut entraîner des variations lors de l'enregistrement des mesures.

Le capteur de croupe :

Le capteur de croupe est un accéléromètre permettant d'enregistrer les mouvements verticaux du bassin du cheval en mouvement.

Le capteur de croupe est placé entre les deux tubérosités sacrales sur la ligne sagittale de la croupe. La position exacte est parfois plus complexe à définir que pour les autres capteurs : il s'agit de suivre caudalement le processus épineux de la dernière vertèbre lombaire jusqu'à arriver au point le plus dorsal de la croupe du cheval.



Figure 24 : Mise en place du capteur de croupe pour des évaluations en main (CHVE Livet)

Il est important que le cheval soit d'aplomb sur ses deux postérieurs au moment de la mise en place car les mouvements de rotation du bassin en mouvement induiraient des

erreurs de mesures si le capteur n'est pas au centre du bassin. Lors d'une utilisation courante sur de petites vitesses, le capteur est fixé à une bande auto-agrippante (POLSTER ND) collée sur la croupe du cheval. Le schéma est placé en face dorsale et les diodes électroluminescentes sont orientées vers la droite du cheval.

A grande vitesse, il a été nécessaire d'adapter cette fixation afin que le capteur reste en place et ne soit pas arraché ou endommagé par la croupière. Un nouveau dispositif a été mis en place : une grande bande autocollante est placée sur la croupe afin d'offrir une plus grande surface d'adhérence au cheval. Elle est composée d'un polster sur lequel est accroché un système de fixation qui protège le capteur de la croupière grâce à une bande collante placée entre le capteur et la croupière et fixée sur le système de protection. Ce système a été mis en place au CHVE de LIVET.



Figure 25 : Mise en place du capteur de croupe pour des évaluations attelées (CHVE Livet)

ii) La console d'acquisition

L'ensemble des données enregistrées par les capteurs du Lameness Locator est transmis à une console d'acquisition munie d'un système Bluetooth. La console d'acquisition est une tablette équipée du logiciel du Lameness Locator. Elle permet de lancer à distance l'enregistrement des mesures, d'enregistrer les données et de les retranscrire sous forme de graphiques et de données interprétables par l'observateur.



Figure 26 : Console d'acquisition du Lameness Locator (CHVE Livet)

b) Paramètres enregistrés par le Lameness Locator®

i) Vélocité angulaire du membre antérieur droit

Le capteur placé sur le paturon de l'antérieur droit est un gyroscope permettant de mesurer la vélocité angulaire de ce membre. Il a été démontré que la position des membres au cours du déplacement du cheval est un paramètre relativement sensible dans la détection des boiteries. En effet, ce capteur permet de distinguer les différentes phases de la foulée par détection de l'impact du pied au sol puis de son départ.

En couplant ces données avec celles des mouvements de tête et du bassin, il devient possible d'identifier le membre boiteux. Ainsi, le signal obtenu sera positif lorsque le membre antérieur droit touche le sol et négatif lorsqu'il est en suspension.

En connaissant la position de l'antérieur droit et la durée de la foulée, il est possible d'extrapoler ces données afin de connaître la position des autres membres.

ii) Mouvements verticaux de la tête

L'analyse des mouvements verticaux de la tête représente l'un des paramètres les plus utilisés par les vétérinaires lors de la détection d'une boiterie antérieure chez le cheval. Chez un cheval sain, le balancier de la tête entre les deux phases d'appui de la foulée de trot est symétrique. Chez le cheval boiteux au contraire, il est possible d'observer une asymétrie des mouvements verticaux de la tête : la hauteur maximale de la tête sera ainsi atteinte lorsque le membre boiteux est à l'appui.

Cette dernière notion est à nuancer légèrement : Lors de boiteries d'impact, la position de la tête est plus haute lorsque le membre sain arrive au contact du sol. Le cheval limite l'appui du membre boiteux à l'atterrissage en élevant sa tête. Au contraire, lors de boiteries de poussée, la position maximale de la tête est atteinte lors de la phase de propulsion. Le cheval élève sa tête en fin d'appui pour limiter la charge du membre boiteux au moment de sa poussée. Par contre, ces douleurs à l'impact et à la poussée sont toujours combinées à des douleurs au milieu de la charge (phase de soutènement), et ainsi la position la plus basse de la tête sera toujours plus haute lors du milieu d'appui du membre boiteux par rapport au membre sain. Cette distinction, bien que nécessaire dans le choix du membre boiteux, reste relativement fine à observer à l'œil nu.

Le Lameness Locator parvient sans difficulté à déterminer s'il s'agit d'une boiterie d'impact ou de poussée en comparant les mouvements verticaux de la tête avec les données enregistrées via le capteur du membre antérieur droit indiquant les différentes phases de la foulée, en calculant les différences de hauteurs maximales et minimales de la tête entre le diagonal droit et le diagonal gauche.

iii) Mouvements verticaux du bassin

Les mouvements du bassin et l'évaluation des boiteries postérieures semblent être les plus compliqués à interpréter. En effet, il est important de tenir compte à la fois des mouvements verticaux du bassin et des mouvements de rotation du bassin autour de la jonction lombo-sacrée.

L'évaluation classique par le vétérinaire repose le plus souvent sur une évaluation des mouvements de rotation du bassin.

Un cheval boiteux d'un membre postérieur a tendance à présenter des mouvements de rotation plus importants du côté atteint. Le cheval reporte son poids sur l'autre postérieur et déplace ses hanches à l'opposé du membre boiteux. On dit que le cheval se traverse.

Là encore, il est possible de distinguer des boiteries d'impact et des boiteries de poussée. Lors d'une boiterie d'impact, la hanche du membre atteint s'élève juste avant le poser du membre boiteux pour limiter l'appui sur le membre douloureux. Lors de boiterie de poussée, lorsque le cheval pousse, la hanche du membre atteint s'élève moins que pour le membre sain, en relation avec la faiblesse de poussée du membre douloureux.

Au contraire, les mouvements de rotation du bassin sont assez compliqués à évaluer par l'observateur. En effet, il est compliqué de visualiser à la fois la hauteur du bassin et le poser du membre. La présence d'un marqueur placé sur le sommet de la croupe peut éventuellement simplifier l'observation. Lors d'une boiterie d'impact, le mouvement vers le bas du bassin est plus réduit lorsque le membre sain se met en charge pendant sa phase d'engagement. Lors d'une boiterie de poussée, le mouvement vers le haut du bassin est moins important lorsque le membre sain s'engage. Cette technique reste peu utilisée sur le terrain et on lui préfèrera l'évaluation des mouvements de rotation du bassin précédemment décrit.

Le Lameness Locator quant à lui évalue les mouvements verticaux du bassin grâce au capteur placé au sommet de la croupe, en mesurant les différences de hauteurs maximales et minimales des tuber sacrale entre le diagonal droit et le diagonal gauche.

c) Modélisation des données par le Lameness Locator[®]

i) Modélisation graphique des mouvements d'antérieurs

Les différents capteurs du Lameness Locator permettent d'obtenir des signaux sous forme de vecteurs qu'il s'agit ensuite de transformer en données facilement interprétables par le clinicien.

Les boiteries antérieures sont évaluées grâce aux signaux reçus par le capteur de tête essentiellement. Le gyroscope du membre antérieur droit renseigne sur les temps d'appui ou de poussée du membre antérieur droit ce qui permet de relier les données de l'accélération verticale de la tête avec les différentes phases de la foulée.

i') Évaluation d'une boiterie antérieure

Les signaux obtenus grâce aux capteurs sont transmis au logiciel informatique de l'appareil qui réalise une double intégration puis soumet ces données à un algorithme de traitement d'erreur. Cette transformation mathématique permet d'obtenir 2 harmoniques et une fonction résiduelle.

- La première harmonique représente le mouvement biphasique de la tête chez un cheval sain.
- La deuxième correspond au mouvement de la tête lors d'une boiterie unilatérale.
- La fonction résiduelle reste le plus souvent négligeable dans la description du mouvement.

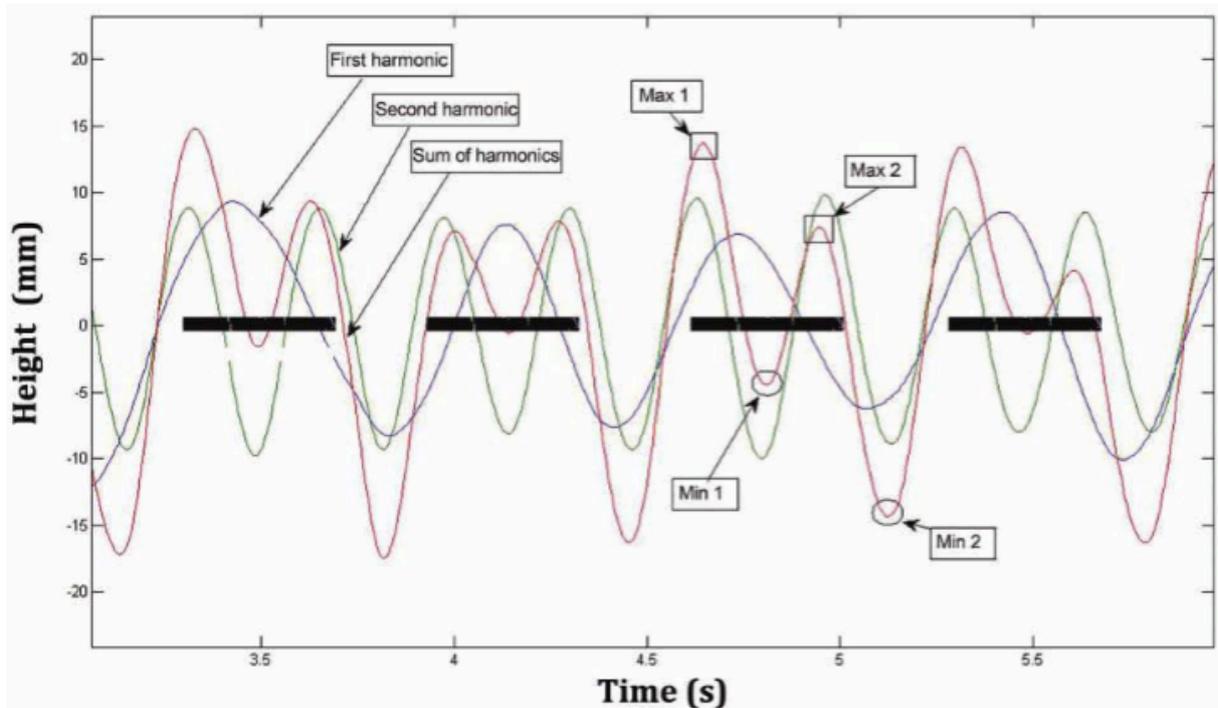


Figure 27 : Représentation graphique des deux harmoniques et de leur somme, obtenues par décomposition des mouvements verticaux de la tête et du bassin. Max 1 représente la position maximale de la tête (ou du bassin) au début de la phase d'appui du pied au sol ; Max 2 représente la position maximale de la tête (ou du bassin) lors de la fin de la phase d'appui ; Min 1 représente la position minimale de la tête lors de la phase d'appui ; Min 2 représente la position minimale de la tête lors de la phase de projection. Les barres noires correspondent à la durée d'appui du membre antérieur droit au sol. (Keegan et al. 2011)

L'asymétrie des mouvements verticaux de la tête peut alors être prise en compte de deux façons différentes :

- Calcul du rapport $A1/A2$:

Le rapport $A1/A2$ est calculé à partir des mouvements verticaux de la tête au cours du mouvement. La valeur $A2$ correspond au mouvement vertical de la tête chez un cheval sain alors que la valeur $A1$ correspond au mouvement vertical de la tête lorsque le cheval présente une boiterie unilatérale. Ce rapport permet donc de définir l'asymétrie du cheval pour un membre donné. Ainsi un cheval parfaitement symétrique présente un rapport $A1/A2 = 0$ puisque la valeur $A1$ est nulle en l'absence de boiterie.

Pour connaître le statut locomoteur des membres antérieurs, les ratios $A1/A2$ sont calculés pour le membre antérieur droit et le membre antérieur gauche indépendamment.

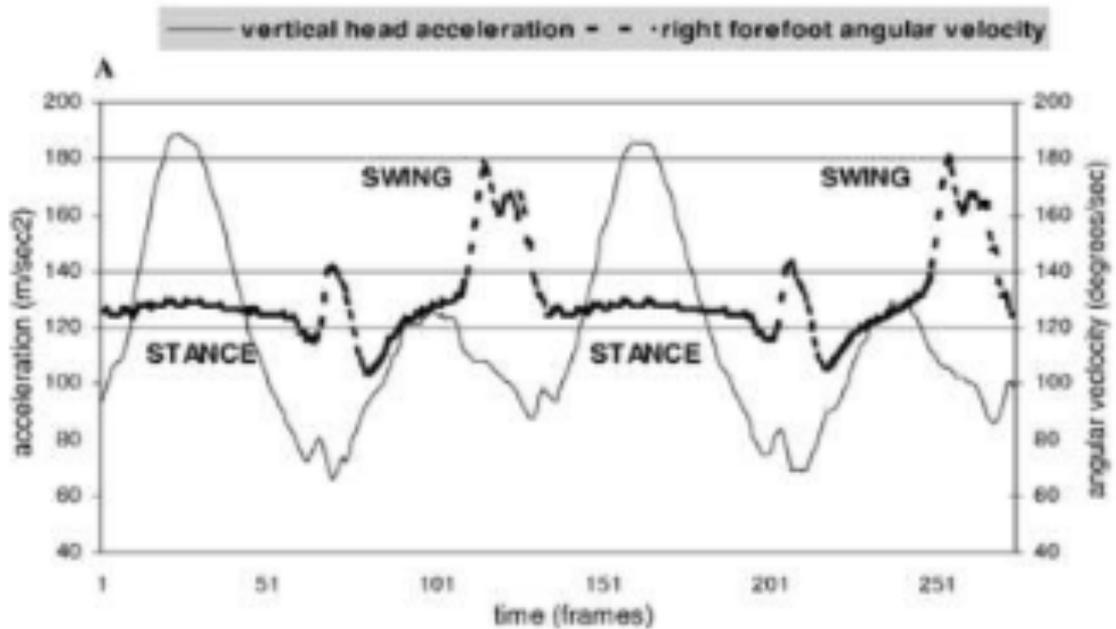


Figure 28 : Mesures d'accélération des mouvements verticaux de la tête et de la vitesse angulaire du membre antérieur droit lors du déplacement (Keegan 2004)

Le graphique précédent correspond aux valeurs brutes enregistrées par le Lameness Locator à partir des capteurs de tête et du gyroscope placé sur le membre antérieur droit. Il s'agit d'une mesure d'accélération enregistrée au cours du temps. Il est possible de distinguer une irrégularité de tracé pour l'accélération verticale de la tête indiquant la présence d'une boiterie d'un membre antérieur.

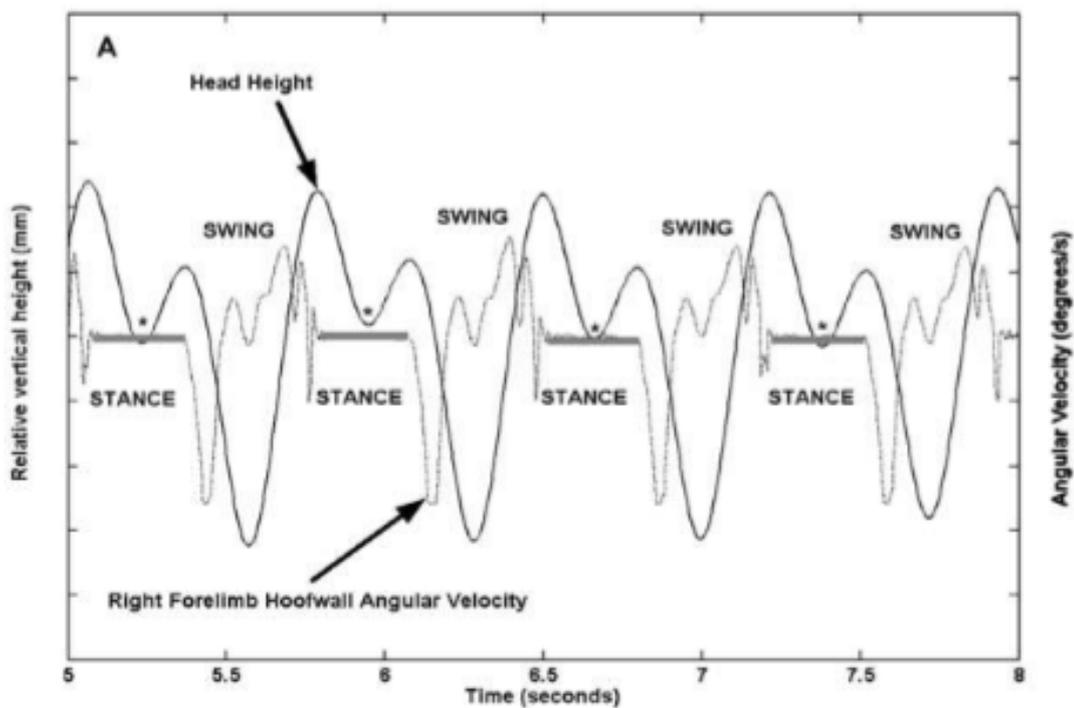


Figure 29 : Représentation graphique des mouvements verticaux de la tête et des vitesses angulaires du membre antérieur droit après transformation des données brutes du Lameness Locator. (Keegan 2004)

Ce second graphique représente les valeurs transformées du premier graphique selon les modèles mathématiques précédemment décrits. Il est possible de distinguer les différentes phases de la foulée (appui ou propulsion) grâce au gyroscope de l'antérieur droit. Grâce à cette donnée, on remarque que la position verticale de la tête est minimale lorsque la vitesse angulaire de l'antérieur droit est également minimale. Cet exemple indique donc la présence d'une boiterie du membre antérieur droit.

Le calcul du ratio $A1/A2$ n'est cependant plus utilisé sur les modèles les plus récents du Lameness Locator car il s'est avéré relativement compliqué à exploiter en pratique courante.

- Calcul des valeurs de Head Diff Max et Head Diff Min :

Par cette deuxième méthode, il s'agit de définir l'asymétrie en comparant sur chaque foulée les mouvements de tête lorsque le membre antérieur droit ou antérieur gauche est à l'appui.

Pour ce faire, il faut faire intervenir deux nouvelles variables qui sont calculées sur chaque foulée :

- Head Diff Max correspondant à la différence entre la position maximale de la tête juste avant l'appui du membre antérieur droit et la hauteur maximale de la tête juste avant l'appui du membre antérieur gauche.
- Head Diff Min correspondant à la différence entre la position minimale de la tête lors de l'appui du membre antérieur droit et la hauteur minimale de la tête lors de l'appui du membre antérieur gauche.

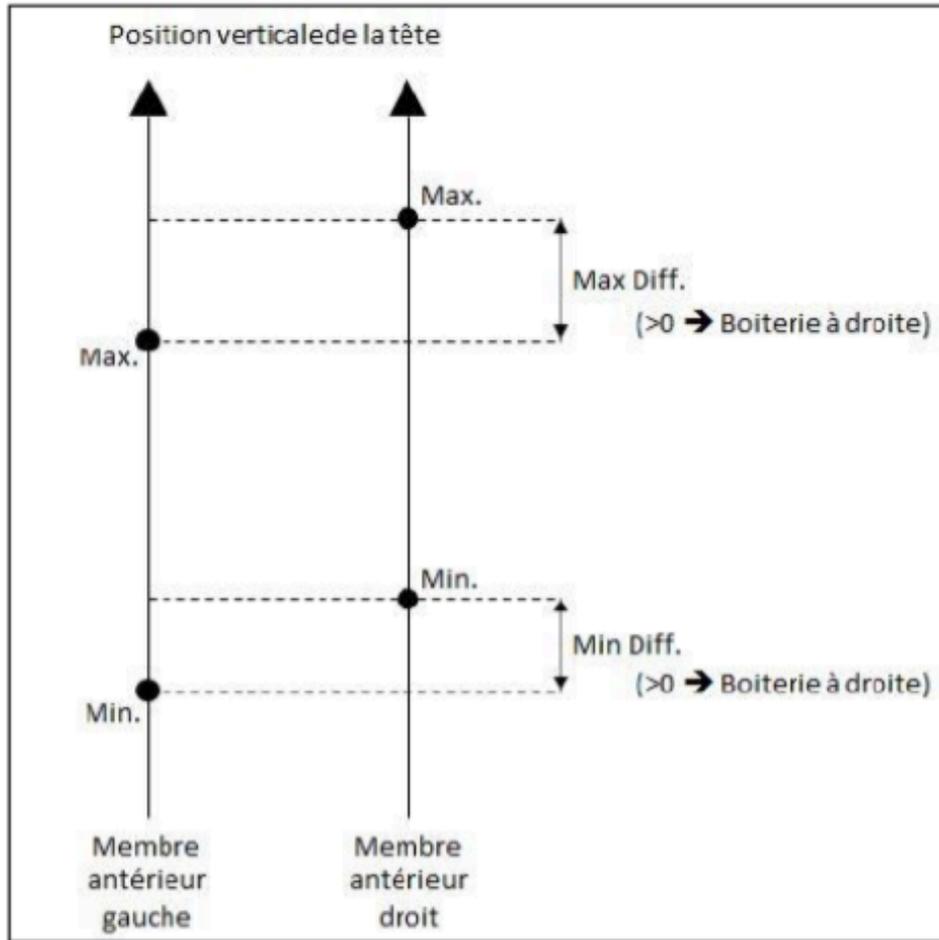


Figure 30 : Principe schématique du calcul des valeurs de Head Diff Max et Head Diff Min (Kamus 2013)

Un cheval parfaitement symétrique présente des valeurs identiques pour les positions maximales et minimales de la tête à l'appui des membres antérieurs droit et gauche.

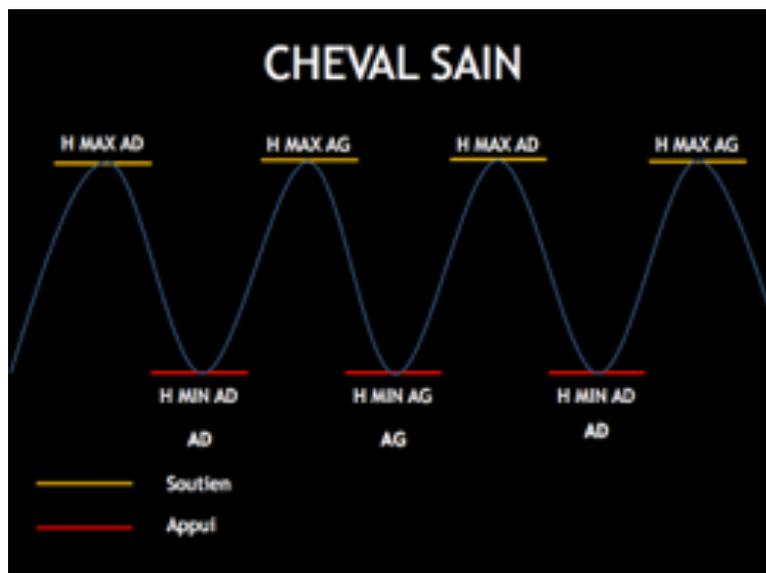


Figure 31 : Déplacement vertical de la tête chez un cheval sain (Caure 2017)

Cependant, lorsque la différence des valeurs de Head Diff Max et Head Diff Min sont non nulles, cela indique la présence d'une asymétrie dans l'allure du cheval.

Ces valeurs renseignent également sur le côté atteint : lorsque les valeurs Head Diff Max et Head Diff Min sont positives, cela indique une boiterie de l'antérieur droit. Au contraire, lorsque ces valeurs sont négatives, la boiterie concerne le membre antérieur gauche.

Le Lameness Locator fournit également la moyenne et l'écart type de ces valeurs sur l'ensemble des foulées enregistrées.

➤ Calcul du Q score :

Chacune des foulées enregistrées par le Lameness Locator est représentée sous forme d'un vecteur. La norme de ces vecteurs, appelée Q score est affichée par l'appareil à l'issue de l'enregistrement.

$$Q\ score = \sqrt{H\ Diff\ Max^2 + H\ Diff\ Min^2}$$

Le Q score indique la sévérité de la boiterie : plus il est élevé, plus la boiterie est intense.

ii') Calcul de la norme de variation chez le cheval sain

A partir des deux grandeurs précédemment décrites, il s'avère nécessaire de définir une norme à partir de laquelle un cheval est considéré comme boiteux pour un membre donné.

En effet, il est rare qu'un cheval soit parfaitement symétrique et présente à la fois un ratio A1/A2 nul et des valeurs Head Diff Max et Head Diff Min identiques pour les membres antérieurs droit et gauche. Pourtant, une légère asymétrie n'est pas forcément responsable d'une boiterie réelle. Il convient donc de définir une norme pour chacune de ces valeurs.

L'étude de Pfau et al. (2014) s'est attachée à définir des normes de référence permettant de statuer sur le caractère sain ou boiteux du cheval : Les expérimentateurs ont choisi de comparer les données fournies par le Lameness Locator et l'évaluation subjective de vétérinaires expérimentés. Les valeurs retenues sont donc celles à partir desquelles une boiterie a pu être subjectivement détectée.

▪ Ratio A1/A2 :

La valeur seuil retenue pour le rapport A1/A2 est de 0.50 pour les membres antérieurs ce qui signifie que lorsque ce rapport indique une valeur supérieure à 0.50, le cheval est boiteux du membre antérieur concerné et si elle est inférieure à 0.50, le cheval est considéré comme sain. Ce ratio n'est cependant plus affiché sur les nouveaux modèles du Lameness Locator.

▪ Head Diff Max et Head Diff Min:

La valeur seuil retenue pour les membres antérieurs est de +6 mm ou -6 mm. Un cheval est donc considéré comme boiteux à partir du moment où il présente une valeur supérieure à +6mm ou inférieure à -6mm.

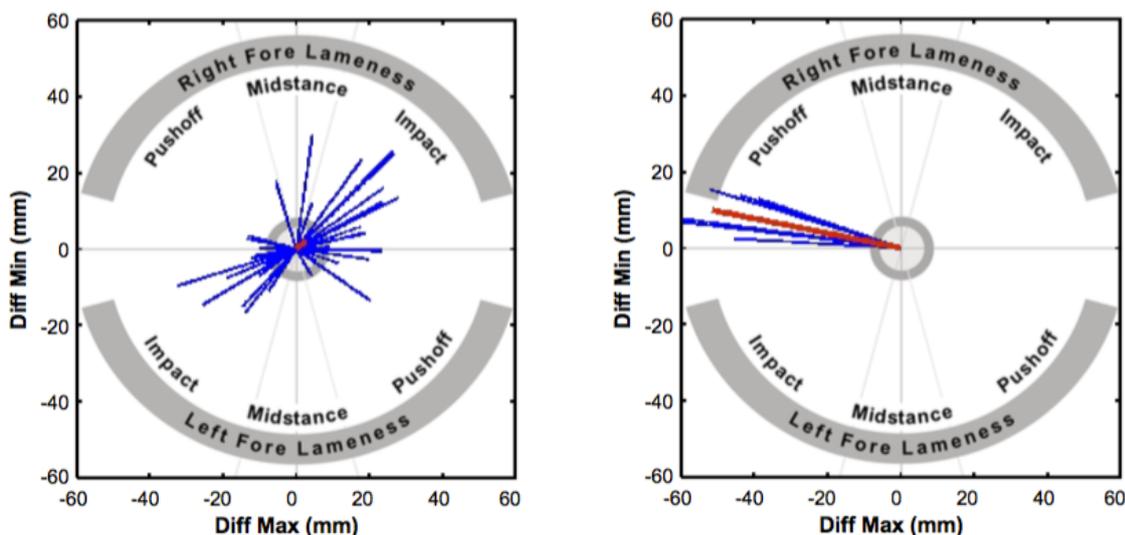


Figure 32 : Diagramme de rayonnement des membres antérieurs : à gauche le cheval est sain de ses membres antérieurs ; à droite, le cheval est boiteux de son membre antérieur droit. (Enregistrements du CHVE de Livet)

A la suite de l'enregistrement, le Lameness Locator fournit un graphique dans lequel sont retracées les valeurs obtenues pour chacune des foulées. Chaque foulée est représentée par le biais d'un trait bleu. L'appareil réalise ensuite une moyenne sur l'ensemble des données enregistrées (représentée par un trait rouge) et un écart-type permettant de juger de la fiabilité de l'enregistrement.

Dans cet exemple, le premier cheval présente une moyenne de valeurs inférieure à 6mm, il est donc considéré comme sain de ses membres antérieurs. La disparité des mesures peut être reliée à des mouvements irréguliers du cheval au cours de l'enregistrement et doit être prise en compte dans l'interprétation des mesures.

Au contraire, l'enregistrement de droite indique clairement une boiterie puisque la valeur est largement supérieure aux 6mm requis.

Le signe de Head Diff Min indique le membre antérieur atteint :

- Si la valeur de Head Diff Min est supérieure à +6 mm, le cheval présente une boiterie du membre antérieur droit.
- Si la valeur de Head Diff Min est inférieure à -6 mm, il s'agit au contraire du membre antérieur gauche.

Le signe de Head Diff Max permet d'établir la phase de la foulée au cours de laquelle survient la boiterie.

- Si la valeur de Head Diff Max est supérieure à +6 mm, il peut s'agir soit d'une boiterie d'impact du membre antérieur droit soit d'une boiterie de poussée du membre antérieur gauche.
- Si la valeur de Head Diff Max est inférieure à -6 mm, il peut s'agir au contraire soit d'une boiterie de poussée du membre antérieur droit et d'une boiterie d'impact du membre postérieur gauche.

Les deux graphiques suivants représentent les mouvements de la tête vers le haut ou vers le bas dans le cas d'une boiterie d'impact de l'antérieur droit et dans le cas d'une boiterie de poussée de l'antérieur droit :

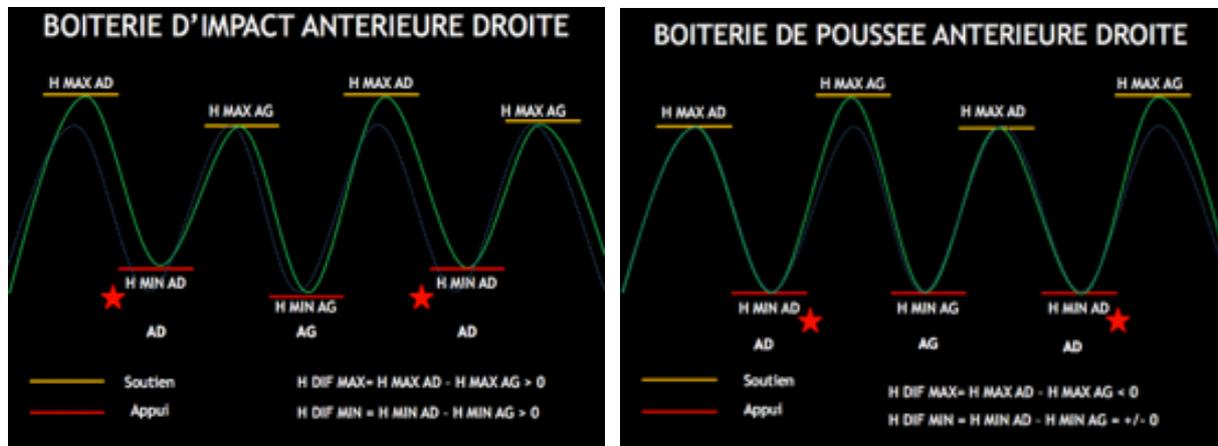


Figure 33 : Déplacement vertical de la tête dans le cas d'une boiterie d'impact de l'antérieur droit (à droite) et d'une boiterie de poussée de l'antérieur droit (à gauche)

iii') Diagramme de rayonnement des antérieurs

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique permettant de visualiser rapidement les principales caractéristiques de la boiterie.

Le diagramme se compose de 4 quadrants distincts pour les membres antérieurs dans lesquels se répartissent les différents signaux enregistrés par le Lameness Locator.

L'axe des abscisses correspond aux valeurs de Head Diff Max. Les valeurs positives sont situées à droite de l'origine.

L'axe des ordonnées représente les valeurs de Head Diff Min. Les valeurs positives sont situées au-dessus de l'origine.

Un cercle grisé autour de l'origine représente les normes à partir desquelles une boiterie est détectée (il correspond aux valeurs -6mm et +6mm évoquées précédemment).

Chaque signal est représenté sous la forme d'une droite dont la longueur correspond à l'amplitude du mouvement asymétrique de la tête. La tendance globale du mouvement est représentée par une droite rouge.

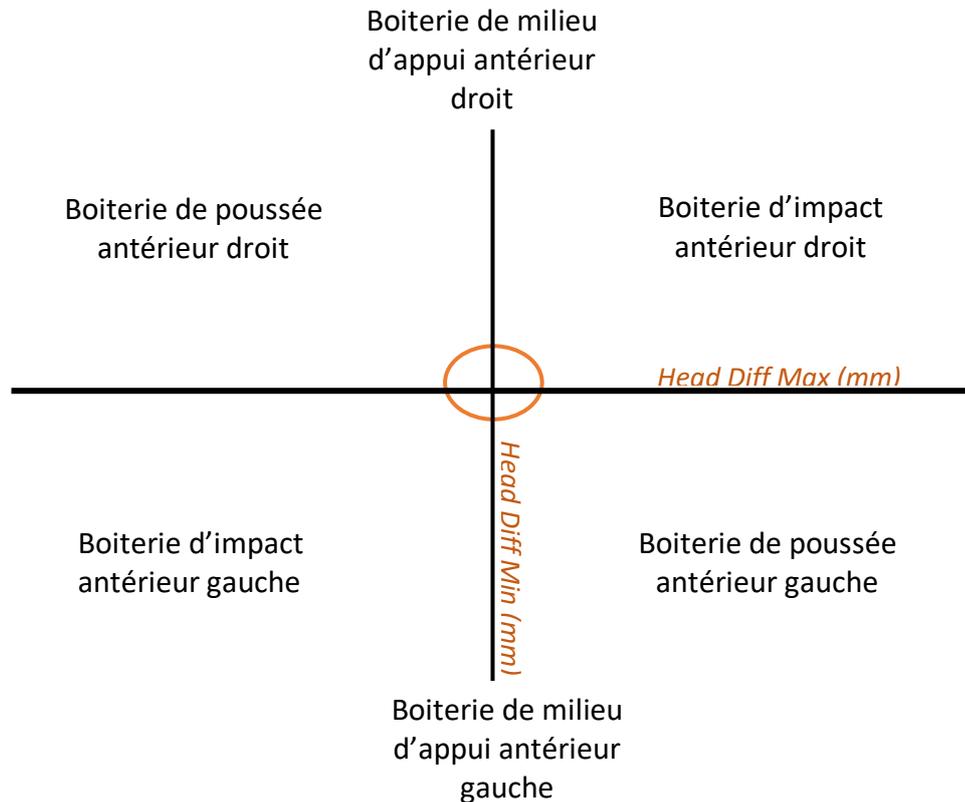


Figure 34 : Représentation du diagramme de rayonnement des membres antérieurs

Grâce à ce diagramme, il est possible de caractériser plus précisément la boiterie :

- Lorsque le signal principal se situe dans le quadrant supérieur droit, la boiterie concerne le membre antérieur droit lors de la première phase d'appui du membre au sol ; il s'agit donc d'une boiterie d'impact à droite.
- Lorsque le signal principal se situe dans le quadrant supérieur gauche, la boiterie concerne le membre antérieur droit lors de la seconde phase de l'appui du membre au sol ; il s'agit donc d'une boiterie de poussée à droite.
- Lorsque le signal principal se situe dans le quadrant inférieur droit, il s'agit d'une boiterie de poussée de l'antérieur gauche.
- Lorsque le signal principal se situe dans le quadrant inférieur gauche, il s'agit d'une boiterie d'impact antérieur gauche.
- Lorsque le signal est positif et se trouve dans l'axe des ordonnées, il s'agit d'une boiterie correspondant au milieu de l'appui du membre antérieur droit au sol.
- Lorsque le signal est négatif et se trouve dans l'axe des ordonnées, il s'agit d'une boiterie correspondant au milieu de l'appui du membre antérieur gauche au sol.
- Lorsque les signaux se situent sur l'axe des abscisses, la boiterie est localisée à la fin de la phase d'appui du membre ou au début de l'engagement de l'autre membre antérieur.

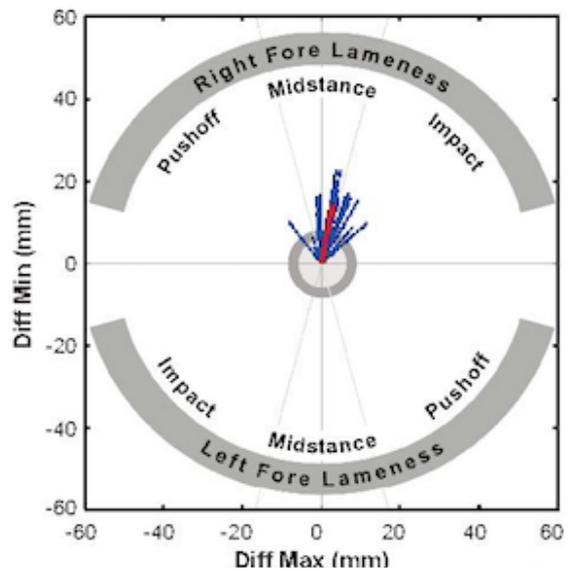
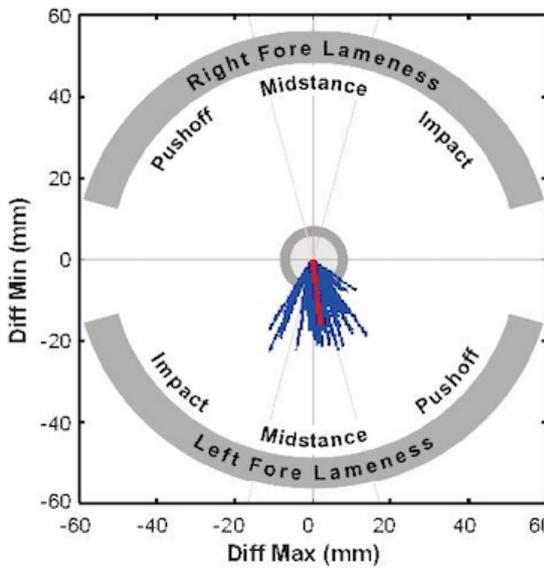
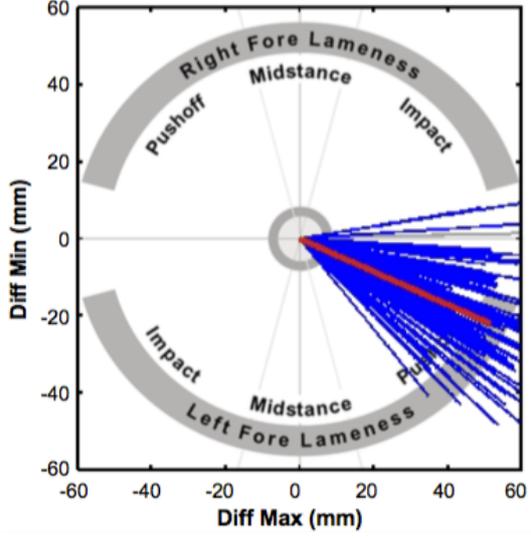
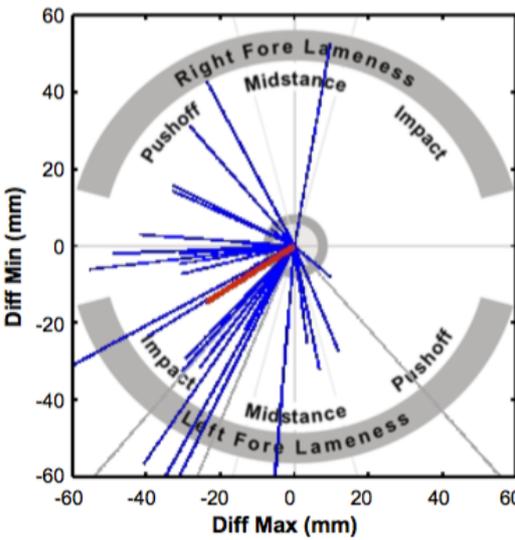
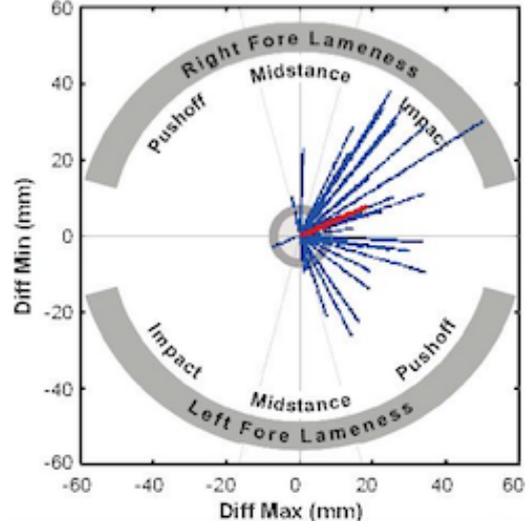
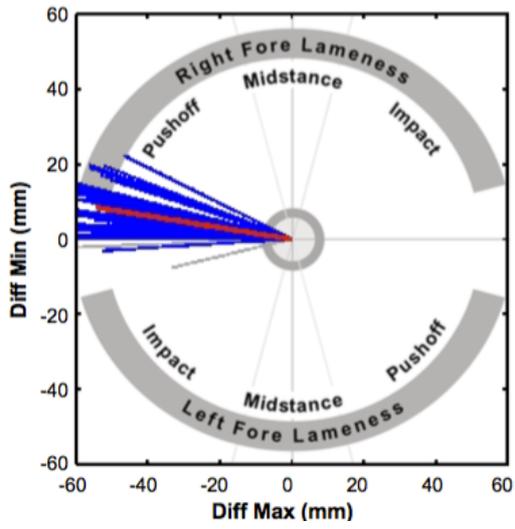


Figure 35 : Diagramme de rayonnement des antérieurs correspondant à : A. Une boiterie de poussée du membre antérieur droit, B. Une boiterie d'impact du membre antérieur droit, C. Une boiterie d'impact du membre antérieur gauche, D. Une boiterie de poussée du membre antérieur gauche, E. Une boiterie de milieu d'appui du membre antérieur droit, F. Une boiterie de milieu d'appui du membre antérieur droit. (Enregistrements du CHVE de Livet)

ii) Modélisation graphique des mouvements des postérieurs

Dans la même optique que pour l'évaluation d'une boiterie antérieure, l'étude de la locomotion des membres postérieurs consiste à transformer les signaux reçus par le Lameness Locator en valeurs facilement interprétables pour le clinicien.

Les boiteries postérieures sont évaluées grâce aux signaux reçus par le capteur de croupe. Là encore, le gyroscope de l'antérieur droit renseigne les différentes phases de la foulée.

i') Évaluation d'une boiterie postérieure

En se basant sur le même type de transformations informatiques des signaux, il est possible de définir différentes grandeurs permettant de qualifier l'asymétrie des membres postérieurs.

- Calcul du rapport A1/A2 :

Le rapport A1/A2 est calculé à partir des mouvements verticaux de la croupe au cours du mouvement. La valeur A2 correspond au mouvement vertical de la croupe chez un cheval sain alors que la valeur A1 correspond au mouvement vertical de la croupe lorsque le cheval présente une boiterie unilatérale. Ce rapport permet donc de définir l'asymétrie du cheval pour un membre donné. Ainsi un cheval parfaitement symétrique présente un rapport A1/A2 = 0 puisque la valeur A1 est nulle en l'absence de boiterie.

Pour connaître le statut locomoteur des membres postérieurs, les ratios A1/A2 sont calculés pour le membre postérieur droit et le membre postérieur gauche indépendamment.

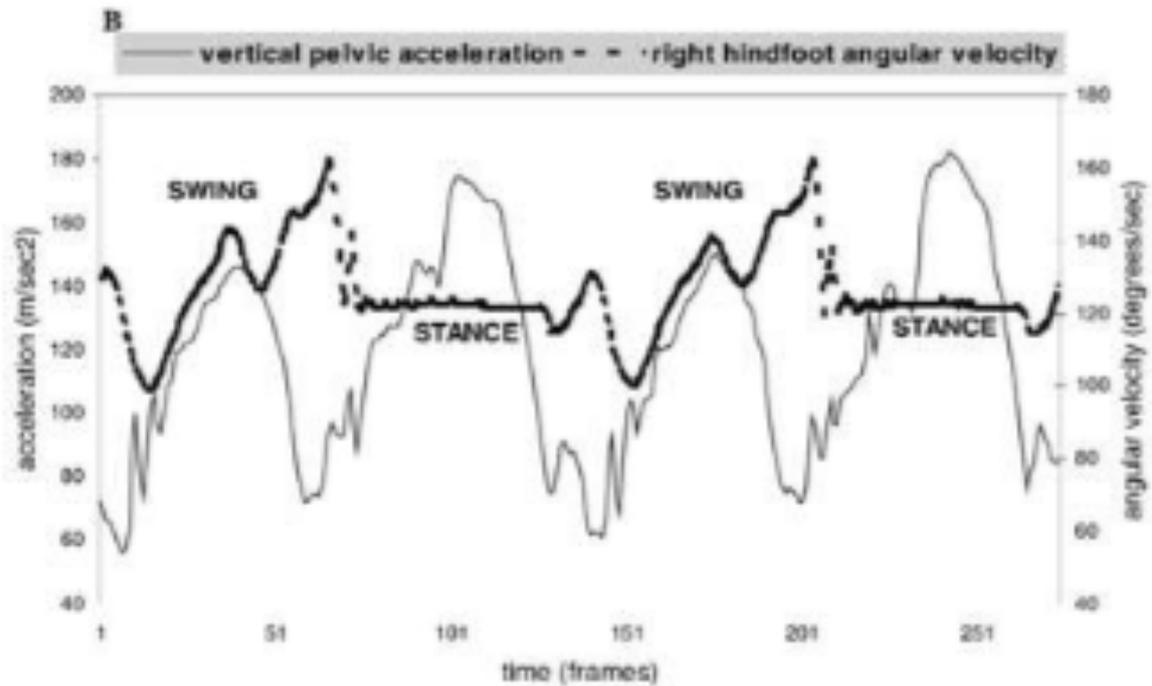


Figure 36 : Mesures d'accélération des mouvements verticaux du bassin et de la vitesse angulaire du membre antérieur droit lors du déplacement. (Keegan 2004)

Comme nous l'avons vu précédemment, un premier graphique est établi à partir des valeurs brutes enregistrées par le Lameness Locator grâce aux capteurs de bassin et du gyroscope placé sur le membre antérieur droit. Il est possible de distinguer une irrégularité de tracé pour l'accélération verticale du bassin indiquant la présence d'une boiterie d'un membre postérieur.

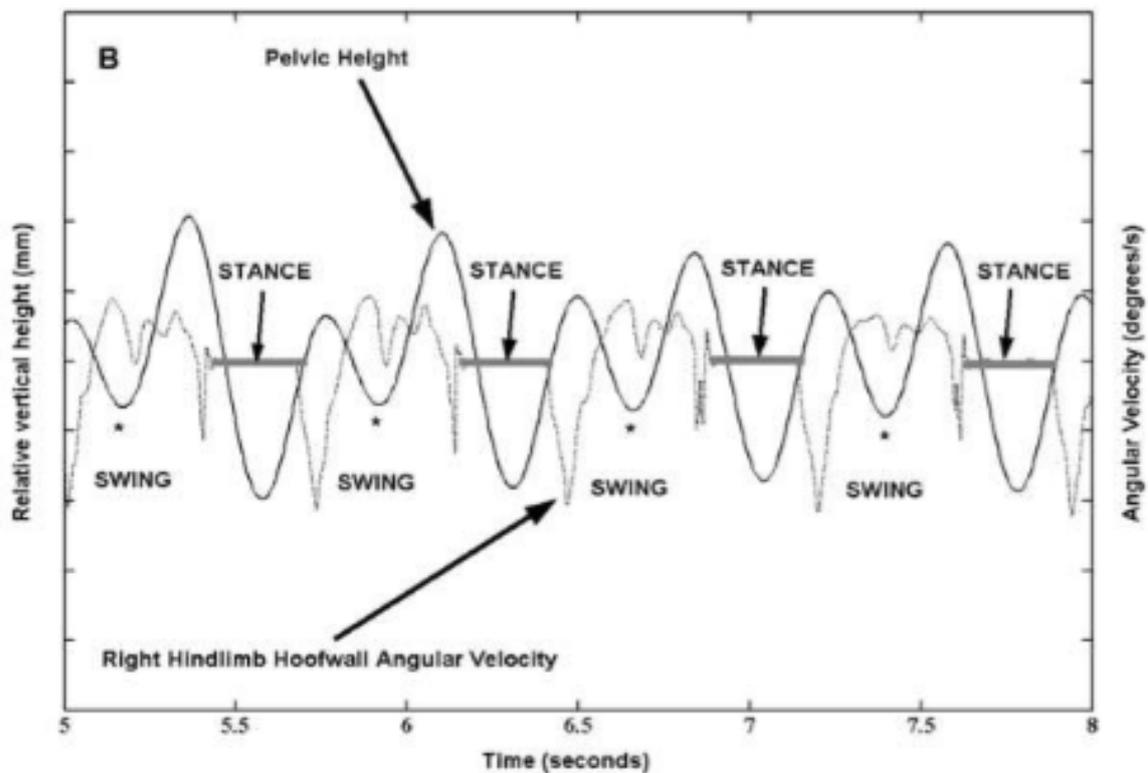


Figure 37 : Représentation graphique des mouvements verticaux du bassin et des vitesses angulaires du membre antérieur droit après transformation des données brutes du Lameness Locator. (Keegan 2004)

Ce second graphique représente à nouveau les valeurs transformées du premier graphique. Il est possible de distinguer les différentes phases de la foulée (appui ou propulsion) grâce au gyroscope de l'antérieur droit. Grâce à cette donnée, on remarque que le bassin descend moins lors de l'appui du membre postérieur gauche. Au trot, l'allure étant symétrique et fonctionnant par bipèdes diagonaux, on en déduit que l'appui du membre postérieur gauche se fait en même temps que l'appui du membre antérieur droit. Cet exemple indique donc la présence d'une boiterie du membre postérieur gauche.

- Calcul des valeurs de Pelvis Diff Max et Pelvis Diff Min :

Par cette deuxième méthode, il s'agit de définir l'asymétrie en comparant sur chaque foulée les mouvements du bassin lorsque le membre postérieur droit ou le membre postérieur gauche est à l'appui.

Pour ce faire, il faut faire intervenir deux nouvelles variables qui sont calculées sur chaque foulée :

- Pelvis Diff Max correspondant à la différence entre la position maximale du bassin juste avant l'appui du membre postérieur droit et la hauteur maximale du bassin juste avant l'appui de membre postérieur gauche.
- Pelvis Diff Min correspondant à la différence entre la position minimale du bassin lors de l'appui du membre postérieur droit et la hauteur minimale du bassin lors de l'appui du postérieur gauche.

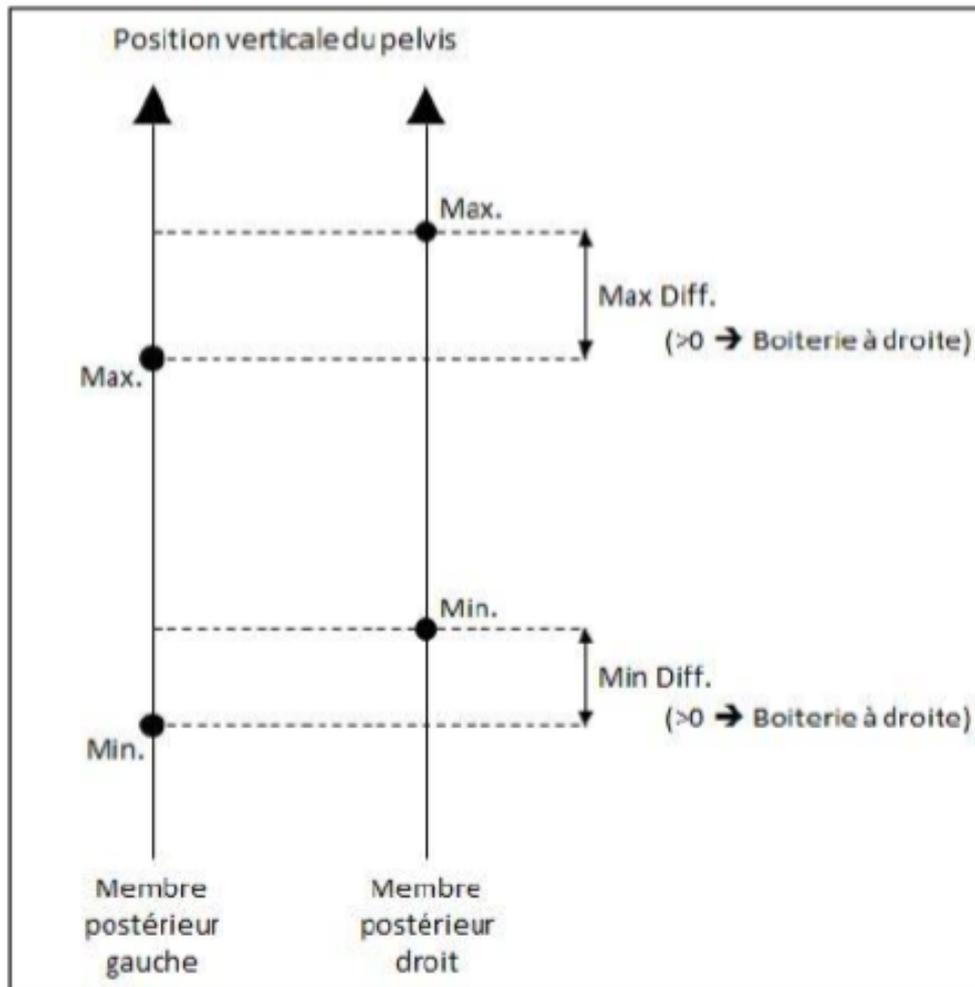


Figure 38 : Principe schématique du calcul des valeurs de Pelvis Diff Max et Pelvis Diff Min (Kamus 2013)

Un cheval parfaitement symétrique présentera des valeurs identiques pour les positions maximale et minimale du bassin à l'appui des membres postérieurs droit et gauche. Cependant, lorsque les valeurs de Pelvis Diff Max et Pelvis Diff Min sont non nulles, cela indique la présence d'une asymétrie dans l'allure du cheval.

ii') Calcul de la norme de variation chez le cheval sain

Sur le même principe que ce que nous avons pu décrire pour les antérieurs, il apparaît comme nécessaire de déterminer une norme à partir de laquelle il est possible de considérer que le cheval est boiteux du membre concerné.

- Ratio A1/A2 :

La valeur seuil retenue pour le rapport A1/A2 est de 0.17 pour les membres postérieurs ce qui signifie que lorsque ce rapport indique une valeur supérieure à 0.17, le cheval est boiteux du membre postérieur concerné et si elle est inférieure à 0.17, le cheval est considéré comme

sain. Comme pour les antérieurs, le ratio A1/A2 n'est plus exploité dans les versions récentes du constructeur.

- Pelvis Diff Max et Pelvis Diff Min :

La valeur seuil retenue pour les postérieurs est de +3 mm ou -3 mm. Un cheval est donc considéré comme boiteux à partir du moment où il présente une valeur supérieure à +3mm ou inférieure à -3mm. Cette norme a été définie dans la même étude de Pfau et al (2014) que pour les membres antérieurs.

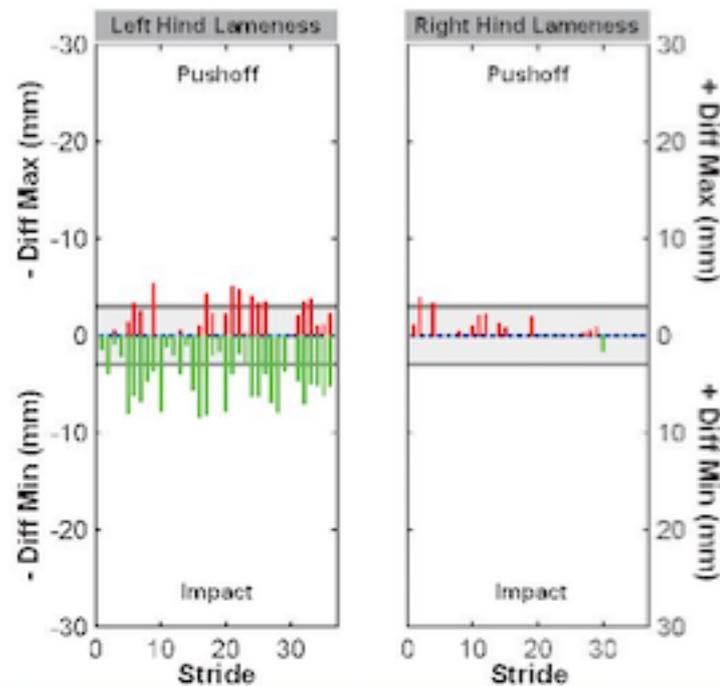


Figure 39 : Diagramme de rayonnement des membres postérieurs sur un cheval présentant une boiterie d'impact et de poussée du membre postérieur gauche. (Enregistrements du CHVE de Livet)

A la suite de l'enregistrement, le Lameness Locator fournit un graphique dans lequel est retracé la valeur obtenue pour chacune des foulées. Chaque foulée est représentée par le biais d'un trait vertical. L'appareil réalise ensuite une moyenne sur l'ensemble des données enregistrées et un écart-type permettant de juger de la fiabilité de l'enregistrement.

Dans cet exemple, le cheval est considéré comme boiteux du membre postérieur gauche puisque la résultante des valeurs est supérieure à 3mm alors qu'il est considéré comme non boiteux du membre postérieur droit puisque la résultante des valeurs est inférieure à 3mm.

Comme pour les membres antérieurs, il est possible de distinguer par un graphique, le membre boiteux et le type de boiterie en fonction du signe de P Diff Max et de P Diff Min :

- Si P Diff Max > 3mm, il s'agit d'une boiterie de poussée du membre postérieur droit.
- Si P Diff Min > 3mm, il s'agit d'une boiterie d'impact du membre postérieur droit.
- Si P Diff Max < -3mm, il s'agit d'une boiterie de poussée du membre postérieur gauche.
- Si P Diff Min < -3 mm, il s'agit d'une boiterie d'impact du membre postérieur gauche.

Comme pour les membres antérieurs, les deux graphiques suivants représentent les mouvements de bassin vers le haut ou vers le bas pour une boiterie d'impact du postérieur droit et une boiterie de poussée du postérieur droit.

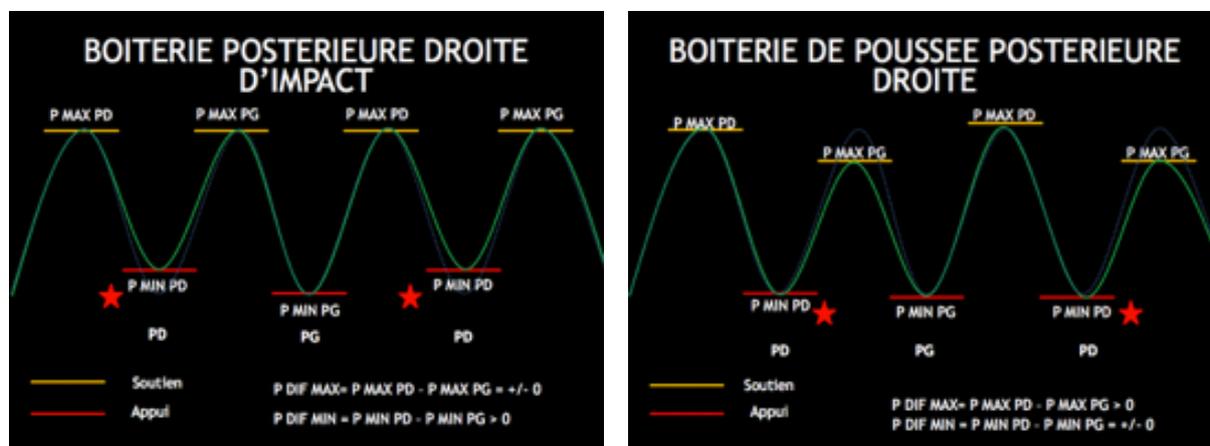


Figure 40 : Déplacement vertical de la tête dans le cas d'une boiterie d'impact du postérieur droit (à droite) et d'une boiterie de poussée du postérieur droit (à gauche)

iii') Diagramme de rayonnement des postérieurs

Le fonctionnement du diagramme de rayonnement des membres postérieurs se construit de façon assez similaire à celui des membres antérieurs : chaque signal représente l'enregistrement d'une foulée et la longueur de ce signal indique l'amplitude de l'asymétrie du bassin.

La représentation graphique s'organise en 2 tableaux : le tableau de gauche représente les boiteries du membre postérieur gauche tandis que celui de droite représente les boiteries du membre postérieur droit.

Des lignes droites parallèles à l'axe des abscisses placées à +3mm et -3mm représentent la norme à partir de laquelle une boiterie est admise.

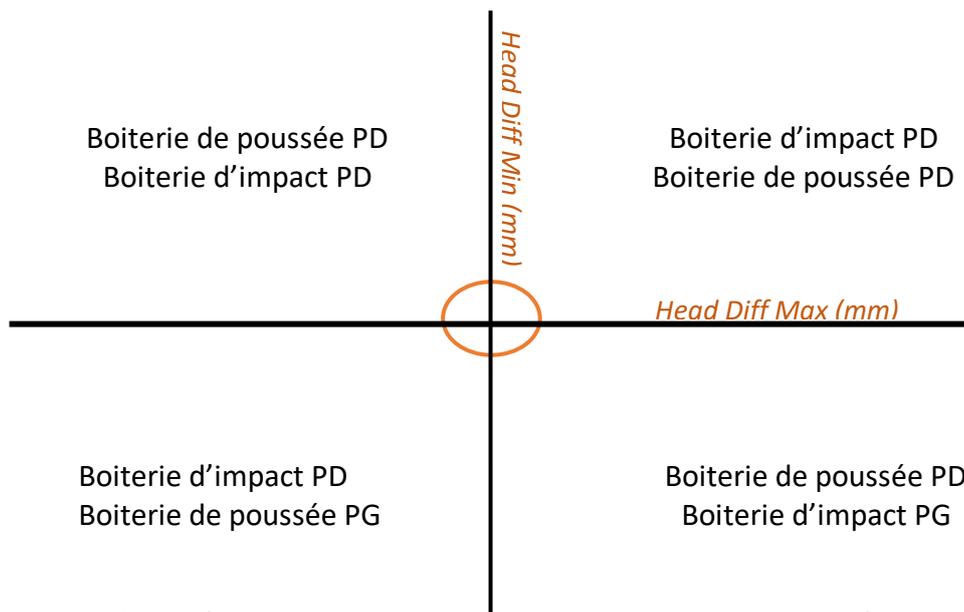


Figure 41 : Représentation du diagramme de rayonnement des membres antérieurs

La lecture des deux graphiques permet de distinguer le type de boiterie présente :

- Lorsque les signaux sont principalement répartis sur le quadrant supérieur droit, il s'agit d'une boiterie de poussée du membre postérieur droit.
- Lorsque les signaux sont principalement répartis sur le quadrant inférieur droit, il s'agit d'une boiterie d'impact du membre postérieur droit.
- Lorsque les signaux sont principalement répartis sur le quadrant supérieur gauche, il s'agit d'une boiterie de poussée du membre postérieur gauche.
- Lorsque les signaux sont principalement répartis sur le quadrant inférieur gauche, il s'agit d'une boiterie d'impact du membre postérieur gauche.

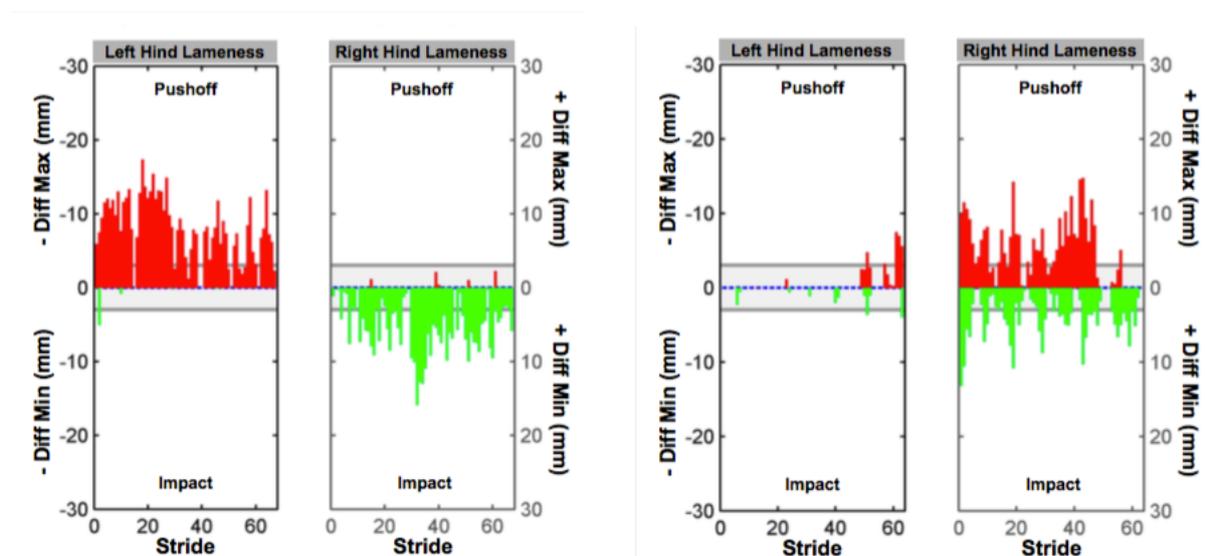


Figure 42 : : Diagramme de rayonnement des membres postérieurs correspondant à : A. Une boiterie de poussée du membre postérieur gauche et une boiterie d'impact du membre postérieur droit ; B. Une boiterie de poussée et d'impact du membre antérieur droit. (Enregistrement du CHVE de Livet

e) Le cas particulier des boiteries compensatoires

L'étude de boiteries compensatoires s'avère relativement intéressante par le biais du Lameness Locator. En effet, il est compliqué de distinguer à l'œil nu le siège primaire d'une boiterie.

Rappelons tout d'abord qu'une boiterie primaire d'un membre antérieur peut créer une boiterie secondaire sur le membre postérieur ipsilatéral et du membre postérieur controlatéral.

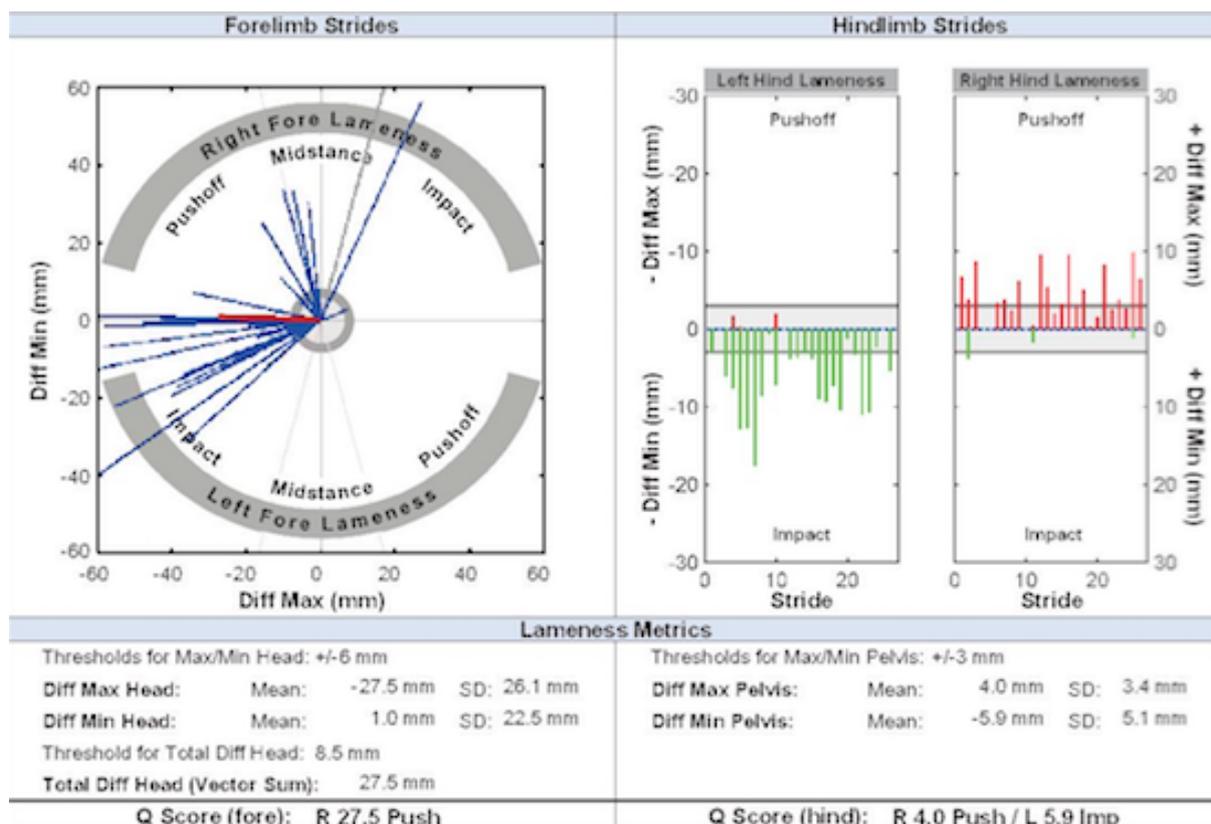


Figure 43 : Diagramme de rayonnement correspondant à une boiterie primaire du membre antérieur droit et des boiteries secondaires des membres postérieurs ipsilatéral et controlatéral. (Enregistrements du CHVE de Livet)

Au contraire, une boiterie primaire d'un membre postérieur peut créer une boiterie secondaire du membre antérieur ipsilatéral. On parle alors de loi des côtés (law of side).

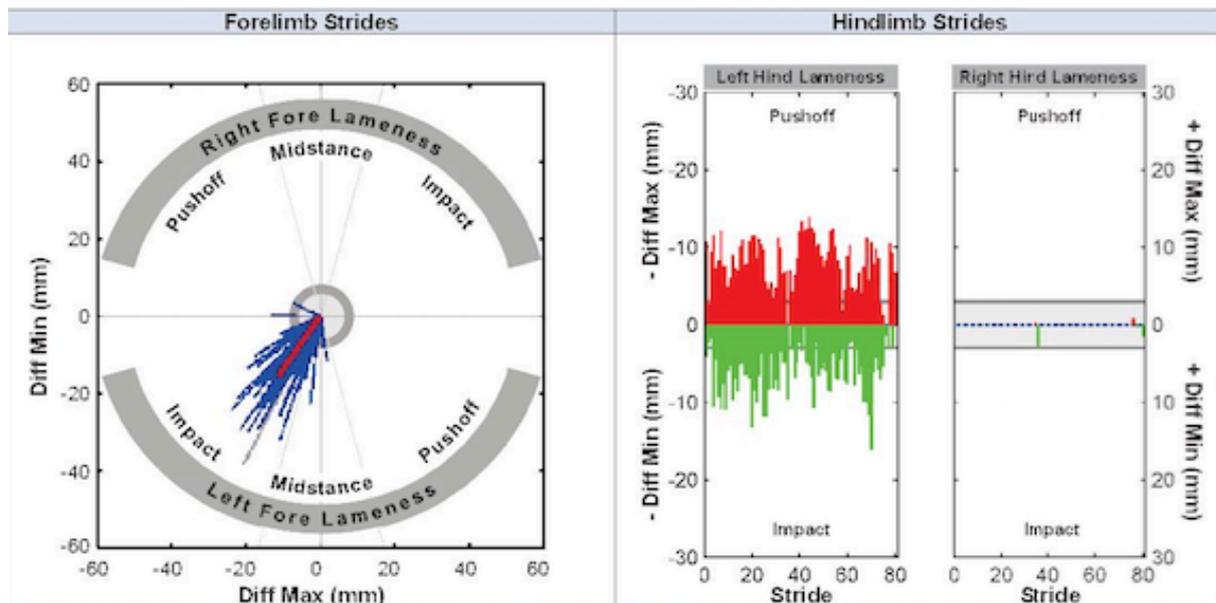


Figure 44 : Diagramme de rayonnement correspondant à une boiterie primaire du membre postérieur gauche et une boiterie secondaire du membre antérieur droit. (Enregistrements du CHVE de Livet)

f) Résultats et interprétation des données du Lameness Locator

Le Lameness Locator offre donc la possibilité de détecter précisément une boiterie et renseigne sur le siège primaire de celle-ci.

Cependant, les résultats affichés par la tablette correspondent à une moyenne de valeurs enregistrées sur l'ensemble des foulées. Ils sont donc à considérer avec précaution. Chaque mesure s'accompagne également de l'écart-type. Ce dernier renseigne notamment sur la précision de la moyenne et la proximité des valeurs par foulée. La probabilité d'interprétation de la boiterie est ainsi d'autant plus faible que la valeur de l'écart-type est faible.

L'écart-type et la moyenne sont à considérer en fonction de la qualité de l'enregistrement : un cheval peu régulier (écart, départs au galop inopportuns etc.) présente une irrégularité de mesure qui rend difficile la lecture des données. De plus, il est nécessaire d'effectuer une mesure sur un nombre suffisant de mesures pour que la moyenne établie par la machine soit réellement fiable. Le constructeur recommande ainsi un enregistrement sur 20 à 25 foulées pour un examen en ligne droite et un enregistrement d'une cinquantaine de foulées pour un examen en cercle.

g) Autres méthodes d'accélérométrie : CMI et GPS

D'autres outils tels que les GPS et les centrales de mesures inertielles ont également été développés dans le cadre d'une évaluation biomécanique de la locomotion du cheval.

Les GPS fournissent une information de position d'un mobile à partir de données collectées par satellites.

Les centrales de mesures inertielles, principalement utilisées en navigation ou par les services militaires afin de pallier les brouillages GPS, fournissent des données d'accélération et de

vitesse angulaire d'un mobile. Elles sont constituées de trois gyromètres permettant de calculer la vitesse angulaire dans les trois dimensions de l'espace et de trois accéléromètres calculant la résultante des forces extérieures (autres que la force gravitationnelle) appliquées au mobile.

Une étude récente de Bragança et al. (2016) s'est intéressée à comparer les paramètres caractérisant la foulée à partir de centrale de mesure inertielle, de plaque de force et d'enregistrement vidéo sur 7 chevaux évalués successivement au pas et au trot. Il apparaît que la centrale de mesure inertielle fournit des données de bonne précision avec un faible pourcentage d'erreur (1,9%) au pas en comparaison des données obtenues avec la plaque de force. Au trot, le pourcentage d'erreur des mesures augmente assez fortement (9,1%) indiquant une difficulté du système de mesure à détecter des variables à vitesse plus élevée. D'après les auteurs, cette méthode reste toutefois intéressante car elle offre une mesure objective d'assez bonne qualité tout en restant facile à mettre en place sur le terrain et de faible coût.

Pfau et al. (2015) se sont également interrogés sur l'utilisation de smartphone dans la détection et la quantification des boiteries. Certaines applications permettent en effet de mesurer l'accélération d'un mobile dans l'espace. Un smartphone correctement positionné sur le dos d'un cheval permet ainsi d'obtenir des données d'accélérométrie de qualité suffisante pour une application courante d'examen locomoteur sur le terrain.

h) Conclusion

L'utilisation de capteurs inertiels dans l'évaluation objective d'une boiterie semble être une voie d'étude récente mais cependant très prometteuse par son application possible sur le terrain et la facilité d'interprétation des données.

D'après les dernières études effectuées, le Lameness Locator® fournit des données stables et répétables dans le temps lors d'examen locomoteur du cheval en main. Il s'avère donc être un dispositif intéressant pour comparer la fiabilité des mesures subjectives d'un observateur.

Comme tout dispositif de mesure, il nécessite évidemment de bien connaître le fonctionnement du Lameness Locator et les limites des mesures afin de ne pas fausser l'interprétation.

DEUXIÈME PARTIE :

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

COMPARAISON ENTRE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA LOCOMOTION ET LES DONNÉES OBJECTIVES FOURNIES PAR LE LAMENESS LOCATOR® EN MAIN PUIS AU COURS D'UN TEST D'EFFORT STANDARDISÉ SUR PISTE CHEZ DES TROTTEURS ATTELÉS

I – INTRODUCTION

1) Objectif de l'étude expérimentale

L'objectif principal de cette étude consiste à comparer l'évaluation subjective d'une boiterie réalisée par un opérateur expérimenté et l'évaluation objective mesurée par un dispositif d'accélérométrie : le Lameness Locator. Ces essais s'effectuent pour la première fois sur des trotteurs en main puis attelés à la piste et évalués sur des vitesses croissantes.

Comme nous l'avons développé précédemment lors de la partie bibliographique, les études de la locomotion sur le trotteur attelé sont relativement succinctes. En effet, l'évaluation d'une boiterie par un vétérinaire se réalise le plus souvent en main lors de tests standardisés à petite vitesse en multipliant les circonstances possibles d'apparition d'une boiterie (changement de terrain, évolution du cheval sur une ligne droite ou sur une courbe etc.). Très peu d'exams orthopédiques se réalisent sur des chevaux attelés à grande vitesse. Pourtant, certaines boiteries ne s'expriment qu'à vitesse soutenue ou lors d'un entraînement de longue distance. Nous jugeons donc intéressant de développer au travers de ces tests attelés, les caractéristiques de la locomotion du trotteur attelé à grande vitesse et les différences pouvant exister entre les évaluations en main et attelées.

Si beaucoup d'études se sont jusque-là penchées sur la qualité et l'exactitude de l'évaluation du vétérinaire lors d'un examen en main, très peu d'études au contraire ont développé le sujet sur des chevaux à grande vitesse. Nous nous intéressons aux types d'erreurs commises par le vétérinaire et aux limites d'évaluation de la locomotion des trotteurs attelés.

Le modèle mis en place a pour objectif d'évaluer :

- La corrélation entre les évaluations subjectives et objectives en déterminant les types de boiteries les plus sujettes à une erreur de l'observateur.
- La répétabilité des mesures entre les différentes dates d'évaluations.
- Les signes cliniques les plus adéquats à prendre en compte pour repérer une boiterie à grande vitesse.

Il s'agit de mettre en place un système permettant :

- Une évaluation objective par un enregistrement de données accélérométriques précises même à grande vitesse.
- Une résistance et une application possible en conditions de terrain.
- Un couplage possible avec une évaluation subjective et une répétition des mesures

2) Partenaires de l'étude expérimentale

Cette étude se greffe à une étude commandée par un laboratoire afin de connaître l'efficacité anti-inflammatoire d'un complément alimentaire. Elle est réalisée par l'entreprise EQUI-TEST. Les résultats sont cependant confidentiels et n'interfèrent pas avec les mesures. Nous ne nous y intéresserons pas au cours de l'étude.

Les partenaires reliés à cette étude sont :

- EQUI-TEST (sous la direction du Dr Claire LEULEU)
- Le Centre Hospitalier Vétérinaire Équin de Livet (sous la direction du Dr Sébastien CAURE et du Dr Loïc VALLOIS)
- Le CISCO-ONIRIS (sous la direction du Dr Caroline TESSIER).

3 études se greffent sur les tests effectués : la première d'entre elles, présentée ici, compare l'évaluation subjective (par un observateur) à une évaluation objective (par le Lameness Locator). Une deuxième étude établit la corrélation entre les mesures objectives de l'appareil de mesure lorsque les chevaux sont évalués en main ou attelés. Enfin, une troisième étude développe la corrélation entre les mesures objectives de locomotion et les mesures de paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque et la lactatémie au cours d'efforts standardisés.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. MATÉRIEL

1) Chevaux testés

a) Critères d'inclusion

La sélection des chevaux pour la participation aux tests repose essentiellement sur la disponibilité des chevaux au cours des 2 mois d'étude. Les chevaux doivent être qualifiés et être à l'entraînement depuis 2 mois au minimum. Aucun problème physique ne doit entraver les mesures effectuées (ni problème médical ou boiterie connue, période de repos ou indisponibilité lors des jours de tests).

Les chevaux n'ont cependant pas subi de test d'entrée pour vérifier l'absence de boiterie au préalable. Les critères d'âge, de sexe ou d'expérience en course n'ont pas été retenus.

b) Chevaux sélectionnés

Les chevaux testés au cours de l'étude sont 19 trotteurs sélectionnés dans deux écuries de course différentes. Ces chevaux ont entre 2 et 7 ans avec une moyenne d'âge de 4,7 +/- 1,8 ans. L'effectif choisi est volontairement large afin d'inclure des chevaux d'expérience variable. L'effectif comprend 6 juments, 4 entiers et 9 hongres.

Des mesures sont effectuées à J0, J30 et J60 en main et attelés et à J15 uniquement en main. Les premières mesures sont réalisées sur les 19 chevaux. Malheureusement, ces mesures n'ont pas forcément pu être réitérées au cours des essais suivants sur tous les chevaux pour cause de réforme ou de départ prévu en course les jours d'examen. Ainsi, nous disposons des mesures complètes pour 11 chevaux au total et incomplètes pour 7 chevaux.

Tableau 3 : Participation des chevaux aux tests en fonction des dates d'évaluation

Cheval	Entraîneur 1									Entraîneur 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dates	J0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	J30	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	J60	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+

2) Conditions de réalisation des tests

Les chevaux sont évalués dans deux écuries différentes donc sur deux pistes différentes :

- L'entraîneur 1 dispose d'une piste oblongue en sable (Vigna Grosbois 0,4mm) dont l'état reste relativement correct malgré les intempéries. Les chevaux tournent toujours à main droite.
- L'entraîneur 2 dispose d'une piste droite en sable de même type que la piste précédente mais qui est beaucoup moins stable en cas d'intempérie. Les chevaux sont évalués sur un aller-retour donc soit en sortie de virage à droite, soit en sortie de virage à gauche. L'échauffement est réalisé à main droite sur une piste de promenade.

3) Contexte des tests en main et attelés

L'évaluation en main s'effectue sur une ligne droite d'asphalte de 50m de long, légèrement inclinée chez l'entraîneur 1 et 30m de long en terrain plat chez l'entraîneur 2. Les chevaux sont alors évalués sans échauffement au préalable, sur deux allers et retours au trot. Les chevaux sont équipés du Lameness Locator déclenché en ligne droite lorsque le cheval prend le trot. L'observateur dicte à son secrétaire la gradation de la boiterie qu'il observe sur chaque membre.

Une fois attelés, les chevaux sont évalués par groupe de 2 à la file indienne afin d'évaluer les deux chevaux l'un après l'autre. Ils réalisent un premier échauffement de 10 minutes, corde à droite et sont évalués par le Lameness Locator et par l'observateur en ligne droite.

L'observateur est placé dans une voiture (siège arrière du milieu) qui roule parallèlement aux chevaux et à la hauteur du cheval évalué. Un enregistrement vidéo est également réalisé par une personne placée à l'arrière de la voiture.

Une fois l'échauffement terminé, des enregistrements sont réalisés à trois paliers de vitesses croissantes (30, 36 et 40 km/h). Les chevaux sont maintenus à vitesse constante pendant 3 minutes par les drivers et les mesures s'effectuent uniquement sur les lignes droites. La vitesse est maintenue constante par le driver grâce au système Polar Team Pro qui indique la vitesse du cheval en temps réel.

Chez l'entraîneur 1, les chevaux ne sont évalués qu'à main droite avec un opérateur situé à droite des chevaux. Chez l'entraîneur 2, comme il s'agit d'un aller-retour, le cheval équipé des capteurs blancs est évalué sur son côté gauche et le cheval équipé des capteurs noirs est évalué sur son côté droit.

3) Accéléromètres

Les chevaux sont tous équipés du Lameness Locator avec 3 capteurs (tête, croupe, paturon de l'antérieur droit). La tablette d'enregistrement est déclenchée par un passage de

la voiture lorsque les chevaux entament la ligne droite et interrompue à la fin de cette dernière. Le cheval ayant été équipé des capteurs blancs est placé en tête ; celui équipé des capteurs noirs est placé en second.

Il peut arriver que certains capteurs se déconnectent au cours des mesures. Le cheval est donc arrêté à la fin du temps imparti afin de reconnecter le capteur. Certaines mesures n'ont ainsi pas pu être prises en compte.

4) Caméra

Chaque test effectué est également filmé par le biais d'une caméra vidéo numérique standard (25 Hz). La caméra est embarquée à bord du véhicule et un passager arrière est responsable de l'enregistrement qui démarre simultanément au lancement de l'enregistrement du Lameness Locator. Ces vidéos peuvent être visionnées afin d'étudier la répétabilité de l'évaluation des boiteries à posteriori sur la lecture des vidéos. Cette partie ne sera pas traitée dans notre étude.

B. MÉTHODE ET ENREGISTREMENT DES DONNÉES

1) Évaluation de la locomotion en main

a) Par l'opérateur

Comme expliqué précédemment, chaque cheval intégré à l'étude subit un test en main avant d'être amené à la piste. Ce test en main est constitué de deux allers et retours au trot. L'observateur se place à un point fixe de sorte à ce que le cheval s'éloigne de lui à l'aller puis s'en rapproche au retour.

L'évaluateur annonce :

- Le (ou les) membre boiteux : antérieur ou postérieur
- La latéralité : boiterie du membre droit ou gauche
- Le grade de boiterie de 0 à 5/5 selon la grille AAEP modifiée présentée plus haut.

b) Par le Lameness Locator

Le cheval étant équipé des capteurs du Lameness Locator au préalable ; l'enregistrement est lancé au moment où le cheval prend le trot puis stoppé à la fin du retour. Un nouvel enregistrement est effectué pour chaque aller-retour.

Comme il a été précisé lors des parties précédentes, le dispositif d'accélérométrie permet une sortie de données indiquant le membre boiteux, l'intensité de la boiterie, s'il s'agit d'une boiterie d'impact ou de poussée, primaire ou compensatoire.

Les tests en main ne permettent pas toujours d'obtenir une bonne régularité des allures du cheval notamment lors d'écarts si le cheval prend peur. Pour certains cas, l'enregistrement sélectionné est celui pour lequel les écarts-types des valeurs du Lameness Locator sont les faibles. Si les écarts-types sont similaires, une moyenne des valeurs entre les deux enregistrements est réalisée ou un nouvel enregistrement est effectué.

2) Évaluation de la locomotion à la piste

a) Par l'opérateur

À la piste, la voiture est placée de telle sorte à ce que l'observateur reste bien parallèle au cheval évalué pendant toute la durée de l'épreuve.

De la même façon que pour les évaluations en main, l'observateur indique :

- Le (ou les) membre boiteux : antérieur ou postérieur
- La latéralité : boiterie du membre droit ou gauche
- Le grade de boiterie de 0 à 5/5 selon la grille AAEP modifiée présentée plus haut.

b) Par le Lameness Locator

Lors des tests attelés, les chevaux aux capteurs blancs sont évalués en premier, ceux aux capteurs noirs le sont ensuite.

Il a pu arriver que le capteur se déconnecte au cours d'un palier de vitesse. Dans ce cas, si le Lameness Locator n'a pas pu enregistrer suffisamment de données, ce test est classé comme « non interprétable ». Malheureusement, au vu du fonctionnement des tests et de la nécessité de réaliser des prises de sang suite à un temps d'effort précis, ces tests n'ont pas pu être renouvelés en cas d'échec.

C. TRAITEMENT DES DONNÉES

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide des logiciels informatiques d'analyses statistiques Excel et Excelstat.

1) Traitement des données subjectives de la locomotion

Cette première analyse est élaborée à partir de statistiques descriptives réalisées sur le logiciel Excel. Il s'agit d'étudier la répartition des grades de boiteries indiqués par le vétérinaire tout d'abord en prenant en compte l'ensemble des chevaux évalués puis ensuite en distinguant les évaluations en fonction des paliers de vitesses, des pistes et de la date d'évaluation.

Le nombre d'enregistrements variant entre les différents entraîneurs et les dates d'évaluation, les résultats sont indiqués sous forme de pourcentages afin de pouvoir les comparer entre eux.

Une étude de répétabilité des mesures entre J0 et J60 est réalisée à partir des pourcentages moyens de boiterie sur l'ensemble des chevaux évalués à J0, J30 et J60. Les écart-types renseignent sur la dispersion des mesures.

2) Traitement des données objectives du Lameness Locator

Cette analyse consiste en une étude statistique descriptive des données obtenues avec le Lameness Locator.

Choix de la valeur seuil du Lameness Locator :

Ce premier item consiste à déterminer les seuils de détection de boiteries par le Lameness Locator les plus adaptées aux conditions d'évaluation des trotteurs en piste.

Cette étude détermine dans un premier temps les pourcentages de boiteries pour chaque membre avec des seuils augmentant de 2mm pour les antérieurs et de 1mm pour les postérieurs. À partir du logiciel Excel, des graphiques et des courbes de tendances sont établis afin d'analyser la corrélation entre le pourcentage de boiteries et le seuil de la machine. Cette analyse permet ainsi de définir une relation linéaire puis des seuils « type » pour un exercice sur des trotteurs attelés à grande vitesse.

Dans un deuxième temps, nous évaluons l'utilité ou non d'adapter ces seuils en fonction de la vitesse. Les seuils du Lameness Locator sont ainsi établis à chaque palier de vitesse pour chaque membre à partir des relations linéaires établies par les graphiques Excel.

Dispersion des valeurs du Lameness Locator :

Une étude de dispersion des valeurs de H diff Max, H diff Min, P diff Max et P diff Min est réalisée sur le logiciel Excel à partir des fonctions : MOYENNE (), MEDIANE (), QUARTILE (), VAR.P (), ECARTYPE (), ECART.MOYEN (), MIN (), MAX (), MAX () - MIN (). La dispersion est tout d'abord évaluée sur l'ensemble des données puis décomposée à chacun des paliers de vitesses.

L'ensemble des résultats Excel sont retranscrits sous forme de tableaux et de graphiques en « boîtes à moustaches ».

Influence de la vitesse et des pistes sur le type de boiterie :

Le type de boiterie (impact ou poussée) indiqué par le Lameness Locator est évalué en fonction de la vitesse puis de la piste sur lesquels les chevaux évoluent. Les différences entre chaque type de boiterie est soumis à un test statistique du χ^2 réalisé sur Excelstat. Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages en distinguant chaque membre. Une représentation graphique sous forme d'histogrammes est réalisée à partir du logiciel Excel. Pour simplifier le graphique, les paliers 1 à 3 sont regroupés sous forme de moyenne.

3) Notion d'erreurs et confrontation des données objectives et subjectives

Cette troisième partie d'analyse exploite les résultats des analyses descriptives précédentes afin de confronter l'analyse subjective du vétérinaire par rapport aux résultats du Lameness Locator.

a) Définition de la notion d'erreur dans l'analyse subjective

Afin d'évaluer la sensibilité de détection des boiteries par le vétérinaire, il est nécessaire de définir une notion « d'erreur » lorsque l'évaluation du vétérinaire n'est pas en accord avec les données objectives du Lameness Locator.

i) Absence d'erreur

Cette première catégorie permet de définir les évaluations pour lesquelles le vétérinaire n'a pas commis d'erreur. Autrement dit, le vétérinaire indique le même membre boiteux que le Lameness Locator.

Le tableau suivant regroupe les différents cas possibles pour lesquels le vétérinaire ne commet pas d'erreur :

	Absence d'erreur				
Lameness Locator	H diff Min > 0	H diff Max < 0	P diff Max < 0 P diff Min < 0	P diff Max > 0 P diff Min > 0	H diff Min < Seuil H diff Max < Seuil P diff Max < Seuil P diff Min < Seuil
Vétérinaire	AD	AG	PD	PG	Pas de boiterie

ii) Défaut de signalement ou « erreur de compensation »

Cette catégorie permet de prendre en compte les phénomènes de compensation se mettant en place lors d'une boiterie et pouvant fausser l'évaluation du vétérinaire.

Ces « erreurs de compensation » se définissent selon la « loi des côtés » fréquemment utilisée en orthopédie chez le cheval.

La première « loi des côtés » consiste en une compensation d'une boiterie postérieure sur le membre antérieur ipsilatéral. Par exemple, lorsqu'un cheval est boiteux de son membre postérieur droit, une compensation se met en place et une boiterie peut apparaître sur le membre antérieur droit. Ainsi, on considère que le vétérinaire commet une erreur dite de « compensation » si le vétérinaire signale une boiterie antérieur droit mais qu'il ne détecte pas la boiterie du postérieur droit.

Les différents cas d'enregistrements du Lameness Locator lors d'erreur de compensation sont résumés dans le tableau suivant :

Erreur de compensation : Loi des côtés 1		
Lameness Locator	H diff Min > 0 et P diff Min > 0 H diff Min > 0 et P diff Max > 0 H diff Min > 0 et P diff Max > 0 et P diff Min > 0	H diff Max < 0 et P diff Min < 0 H diff Max < 0 et P diff Max < 0 H diff Max < 0 et P diff Max < 0 et P diff Min < 0
Vétérinaire	Dit PD sans signaler l'AD	Dit PG sans signaler AG

La deuxième « loi des côtés » consiste en une compensation d'une boiterie antérieure par une boiterie secondaire d'impact du postérieur ipsilatéral et d'une boiterie de poussée du membre postérieur controlatéral. Autrement dit, si le cheval boite d'une boiterie primaire antérieure droite, il se développe une boiterie compensatoire d'impact sur son postérieur droit et une boiterie de poussée de son postérieur gauche. Ainsi, on considère que le vétérinaire commet un défaut de signalement ou une « erreur de compensation » s'il détecte une boiterie antérieure droite sans signaler la boiterie d'impact du postérieur droit et la boiterie de poussée du postérieur gauche

De la même façon, le tableau suivant représente les différentes occasions où sont commises des erreurs de compensation :

Erreur de compensation : Loi des côtés 2		
Lameness Locator	H diff Min > 0 et P diff Min > 0 H diff Min > 0 et P diff Max < 0 H diff Min > 0 et P diff Max < 0 et P diff Min > 0	H diff Max < 0 et P diff Min < 0 H diff Max < 0 et P diff Max > 0 H diff Max < 0 et P diff Max > 0 et P diff Min < 0
Vétérinaire	Dit AD sans signaler PD et PG	Dit AG sans signaler PG et PD

iii) Erreur modérée

Le vétérinaire peut également commettre des erreurs dites « modérées » : Pour les antérieurs, une « erreur modérée » survient lorsque le vétérinaire détecte une boiterie du membre antérieur droit alors qu'il s'agit d'une boiterie de poussée du membre antérieur gauche ; et inversement lorsqu'il annonce une boiterie antérieur gauche et qu'il s'agit d'une boiterie de poussée antérieur droit. En effet, il est parfois difficile de distinguer des boiteries de poussée sur un antérieur car le poser de l'autre antérieur survient peu de temps après. Le tableau ci-après résume les différentes circonstances pour lesquelles il y aurait une « erreur modérée » sur un membre antérieur.

Erreur modérée antérieure		
Lameness Locator	H diff Max > 0 et H diff Min > 0	H diff Max < 0 et H diff Min > 0
Vétérinaire	AD	AG

Pour les membres postérieurs, une erreur est commise lorsque le vétérinaire ne détecte une boiterie que sur l'un des deux postérieurs alors que le Lameness Locator indique une boiterie bilatérale sur les deux membres postérieurs. Cependant, cette erreur n'est considérée que comme « modérée » lorsque le cheval est plus boiteux du membre postérieur détecté par le vétérinaire que de l'autre postérieur.

Erreur modérée postérieure		
Lameness Locator	$Abs(P \text{ diff Max}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Max}) PD > Abs(P \text{ diff Max}) PG$ $Abs(P \text{ diff Min}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Min}) PD > Abs(P \text{ diff Min}) PG$	$Abs(P \text{ diff Max}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Max}) PG > Abs(P \text{ diff Max}) PD$ $Abs(P \text{ diff Min}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Min}) PG > Abs(P \text{ diff Min}) PD$
Vétérinaire	PD	PG

iv) Erreur majeure

Les erreurs « majeures » sont des erreurs graves commises par le vétérinaire et ne répondant pas aux erreurs précédemment développées. On distingue 3 classes d'erreurs majeures communes aux membres antérieurs et postérieurs :

- Erreur majeure A : Le vétérinaire commet une erreur de côté. Pour les membres antérieurs, le vétérinaire indique une boiterie antérieure alors qu'il s'agit d'une boiterie d'impact de l'autre antérieur. Pour les postérieurs, il indique une boiterie d'un membre postérieur alors que l'autre membre postérieur est boiteux ou que les deux postérieurs sont boiteux mais celui indiqué n'est pas le plus atteint.
- Erreur majeure B : Le vétérinaire ne détecte pas une boiterie sur l'un des membres indiqués boiteux par le Lameness Locator.
- Erreur majeure C : Le vétérinaire détecte une boiterie antérieure ou postérieure qui n'est pas détectée par le Lameness Locator.

Les deux tableaux ci-après regroupent les types d'erreurs majeures commises sur les membres antérieurs et postérieurs.

	Erreur majeure A		Erreur majeure B	Erreur majeure C
Lameness Locator	H diff Max < 0 et H diff Min < 0	H diff Max > 0 et H diff Min > 0	H diff Max > Seuil ou H diff Min > Seuil	H diff Max < Seuil et H diff Min < Seuil
Vétérinaire	AD	AG	Pas de boiterie	AD ou AG

	Erreur majeure A		Erreur majeure B	Erreur majeure C
Lameness Locator	$P \text{ diff Max} < 0 \text{ et } P \text{ diff Min} < 0$ Ou $Abs(P \text{ diff Max}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Max}) PG > Abs(P \text{ diff Max}) PD$ Ou $Abs(P \text{ diff Min}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Min}) PG > Abs(P \text{ diff Min}) PD$	$P \text{ diff Max} > 0 \text{ et } P \text{ diff Min} > 0$ Ou $Abs(P \text{ diff Max}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Max}) PD > Abs(P \text{ diff Max}) PG$ Ou $Abs(P \text{ diff Min}) > \text{Seuil}$ et $Abs(P \text{ diff Min}) PD > Abs(P \text{ diff Min}) PG$	$P \text{ diff Max} > \text{Seuil}$ Ou $P \text{ diff Min} > \text{Seuil}$	$P \text{ diff Max} < \text{Seuil}$ Et $P \text{ diff Min} < \text{Seuil}$
Vétérinaire	PD	PG	Pas de boiterie	PD ou PG

b) Analyse statistique des erreurs commises par le vétérinaire

Des tests statistiques de Kruskal-Wallis comparent les erreurs commises par le vétérinaire en fonction des paliers de vitesses, des entraîneurs, des seuils choisis pour interpréter les résultats du Lameness Locator et des dates d'évaluation.

Pour chaque paramètre évalué, les résultats sont résumés sous forme de tableaux en distinguant les erreurs sur les membres antérieurs et postérieurs. Le pourcentage d'erreurs mineures correspond à la somme des erreurs modérées et compensées. Le pourcentage d'erreurs majeures correspond à la somme des erreurs majeures A, B et C.

Un troisième tableau distingue les erreurs globales sur les membres antérieurs, les membres postérieurs et les erreurs mixtes où le vétérinaire fait une erreur sur les antérieurs et les postérieurs ainsi que la symétrie des erreurs sur les membres droits ou gauches. Les p-values obtenues par les tests de Kruskal-Wallis sont regroupées sous forme de tableaux lorsqu'elles sont inférieures à 0,05.

Des représentations graphiques en histogrammes complètent les résultats chiffrés.

c) Analyse de la corrélation entre le grade de boiterie et les valeurs du Lameness Locator

La corrélation entre le grade de boiterie indiqué par le vétérinaire et les valeurs du Lameness Locator est mesurée à partir de tableaux croisés dynamiques sur le logiciel Excel. Les valeurs de H diff Min sont séparées en fonction du grade établi par le vétérinaire. La moyenne des valeurs et l'écart-type de H diff Min sont calculés pour chaque catégorie. Le graphique en « nuage de points » permet de définir la relation linéaire entre le grade de boiterie et les valeurs de H diff Min.

Pour les postérieurs, on prend la valeur absolue de la somme des P diff Max et P diff Min.

La comparaison des données objectives par le Lameness Locator et les données subjectives issues de l'évaluation du vétérinaire ont fait l'objet d'une analyse statistique utilisant un modèle linéaire à effets mixtes.

Un modèle linéaire à effets mixtes est un modèle hiérarchique dans lequel le premier niveau modélise la réponse individuelle, le deuxième niveau modélise le comportement des paramètres pour l'ensemble de la population.

Par exemple, pour l'étude de l'effet du grade de boiterie et de la piste sur la valeur absolue de la différence de hauteur maximale, le modèle s'écrit :

Niveau individuel :

$$HDiffMax_{ijk} = \alpha_i + \beta_{1i} * \text{Grade de boiterie}_{ij} + \beta_{2i} * \text{Piste}_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Où $1 \leq i \leq n$ avec n le nombre de chevaux testés, $1 \leq j \leq 5$ et $k = J0, J30, J60$

Niveau population :

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha + a_i \\ \beta_{1i} = \beta_1 + b_{1i} \\ \beta_{2i} = \beta_2 + c_{1i} \end{cases}$$

où ε_{ijk} sont les résidus. Ils doivent être indépendamment et identiquement distribués selon une loi $N(0, \sigma^2)$ où σ^2 est la variance résiduelle du modèle.

Les coefficients α , β_1 , β_2 sont appelés effets fixes, ils sont les estimations ponctuelles des paramètres pour l'ensemble de la population.

Les coefficients a_i , b_{1i} , b_{2i} sont les effets aléatoires, ils doivent être distribués selon une loi normale.

La normalité des résidus et des effets aléatoires a été vérifiée et validée pour chaque modèle au moyen de graphiques préconisés par les auteurs des modèles à effets mixtes. (Pinheiro et Bates, 2000)

L'expression des résultats du modèle se fait à l'aide de deux fonctions : la fonction « anova » qui édite le tableau d'analyse de la variance et la fonction « summary » qui édite le tableau des coefficients (effets fixes et aléatoires).

Des comparaisons multiples pour chaque variable qualitative sont réalisées par un test post-hoc de Tukey dans le respect des principes de comparaisons multiples de moyennes (contrôle du calcul du risque de première espèce).

Pour chaque analyse, les données se réfèrent à une p-value de 0,05.

4) Analyse statistique de l'effet corde

L'analyse statistique de la locomotion des chevaux se réalise tout d'abord par une analyse de la symétrie des chevaux en fonction de la main à laquelle ils évoluent et du tournant. L'ensemble des résultats s'exprime sous forme de pourcentage pour chacun des membres et ont été soumis au modèle linéaire à effets mixte.

L'impact de la vitesse sur la symétrie des chevaux est ensuite évalué en distinguant le pourcentage de chaque membre boiteux en fonction de la main à laquelle ils évoluent.

Enfin, on évalue si la position du vétérinaire, à droite ou à gauche du cheval, influence son analyse à partir des erreurs qu'il commet. Comme dans la partie précédente, les erreurs sont définies en pourcentage en distinguant les erreurs mineures et majeures des antérieurs et des postérieurs puis la symétrie des erreurs en fonction des membres droits ou gauches. Des tests de Kruskal-Wallis ont été appliqués pour la fin de cette étude.

III – RESULTATS

A. Résultats de l'analyse subjective de la locomotion

L'ensemble des résultats de cette partie concerne les évaluations subjectives du vétérinaire sans prendre en compte les données obtenues grâce à la machine, qui seront quant à elles étudiées dans un second temps.

1) Évaluation du membre boiteux et gradation de la boiterie

Les pourcentages des grades de boiteries indiqués par le vétérinaire sur chacun des membres sont répartis dans le graphique suivant. Les pourcentages prennent en compte les résultats des mesures effectuées sur l'ensemble des chevaux et aux différents paliers de vitesse.

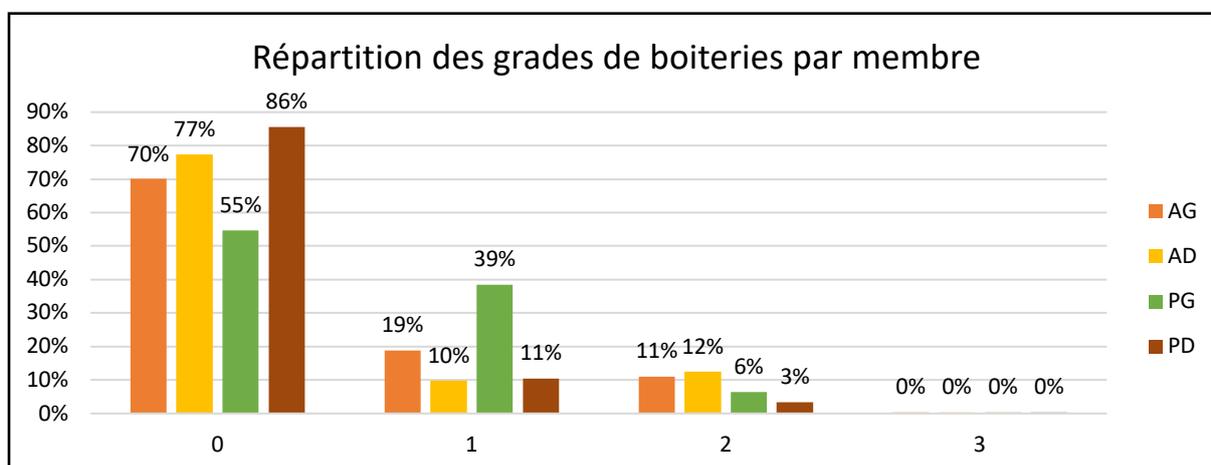


Figure 45 : Représentation graphique de la répartition des grades de boiteries par membre

Sur cet échantillon de 264 évaluations, respectivement 70 et 77% des membres antérieurs gauche et droit sont évalués à un grade 0, autrement dit considérés comme sains. Pour les postérieurs, 86% des membres postérieurs droits présentent un grade de 0 contre 55% pour les membres postérieurs gauches. Le vétérinaire considère donc que plus de 70 à 80% des membres observés sont non boiteux à l'exception du postérieur gauche pour lequel ce pourcentage est nettement inférieur.

Pour ce même postérieur gauche, on retrouve un pourcentage de chevaux ayant un grade de boiterie de 1 supérieur aux autres membres (39% de boiterie de grade 1 pour le postérieur gauche contre 10 à 20% pour les autres membres).

On note également que le pourcentage de chevaux présentant une boiterie de grade 2 est nettement inférieur aux deux autres catégories notamment pour les membres postérieurs.

2) Influence de la vitesse dans la gradation de la boiterie

Les pourcentages des grades de boiteries indiqués par le vétérinaire sur chacun des membres sont répartis dans le tableau suivant, en prenant cette fois en compte le palier de vitesse auquel le cheval est évalué.

Tableau 4 : Répartition des pourcentages de membres boiteux par grade de boiterie en fonction des paliers de vitesse

Membre	Paliers de vitesse	Grade de boiterie			
		0	1	2	3
AG	En main	69%	20%	11%	0%
	Échauffement	67%	22%	10%	0%
	Palier 1 (30km/h)	70%	14%	14%	2%
	Palier 2 (36 km/h)	70%	18%	12%	0%
	Palier 3 (40 km/h)	73%	20%	7%	0%

AD	En main	75%	10%	15%	0%
	Échauffement	76%	6%	18%	0%
	Palier 1 (30km/h)	78%	8%	12%	2%
	Palier 2 (36 km/h)	78%	12%	10%	0%
	Palier 3 (40 km/h)	82%	13%	4%	0%

PG	En main	56%	34%	8%	1%
	Échauffement	45%	41%	14%	0%
	Palier 1 (30km/h)	58%	40%	2%	0%
	Palier 2 (36 km/h)	54%	44%	2%	0%
	Palier 3 (40 km/h)	60%	36%	4%	0%

PD	En main	77%	18%	4%	0%
	Échauffement	92%	6%	2%	0%
	Palier 1 (30km/h)	88%	8%	4%	0%
	Palier 2 (36 km/h)	90%	4%	6%	0%
	Palier 3 (40 km/h)	84%	13%	0%	2%

L'étude du grade de boiterie sur les membres antérieurs montre l'existence d'une tendance similaire entre les membres antérieurs droit et gauche : Plus la vitesse augmente, plus le pourcentage de membres boiteux à un grade 0 ou 1/5 augmente alors que le pourcentage diminue pour les boiteries de grade 2/5.

A contrario, aucune tendance nette ne se détache lors de l'évaluation des postérieurs à des vitesses de course croissantes.

3) Influence des pistes

Les pourcentages des grades de boiteries indiqués par le vétérinaire sur chacun des membres sont répartis dans le tableau suivant, en prenant en compte le palier de vitesse auquel le cheval est évalué et en dissociant les évaluations entre les deux pistes d'entraînement.

Tableau 5 : Répartition des pourcentages de membres boiteux par grade de boiterie en fonction des paliers de vitesse en distinguant les deux entraîneurs

Membre	Paliers de vitesse	Entraîneur 1				Entraîneur 2			
		Grade de boiterie				Grade de boiterie			
		0	1	2	3	0	1	2	3
AG	En main	14%	9%	4%	0%	23%	2%	2%	0%
	Échauffement	9%	6%	2%	0%	15%	3%	1%	0%
	Palier 1	9%	5%	5%	1%	18%	1%	1%	0%
	Palier 2	11%	5%	3%	0%	15%	2%	1%	0%
	Palier 3	14%	3%	2%	0%	11%	4%	1%	0%
AD	En main	16%	2%	1%	0%	12%	3%	1%	0%
	Échauffement	20%	2%	5%	0%	20%	4%	4%	0%
	Palier 1	15%	1%	2%	0%	13%	1%	4%	1%
	Palier 2	17%	1%	1%	0%	13%	2%	4%	0%
	Palier 3	16%	2%	2%	0%	14%	3%	2%	0%
PG	En main	14%	9%	3%	0%	16%	9%	1%	0%
	Échauffement	9%	7%	2%	0%	7%	8%	4%	0%
	Palier 1	12%	6%	0%	1%	10%	9%	1%	0%
	Palier 2	7%	11%	1%	0%	13%	6%	0%	0%
	Palier 3	11%	7%	1%	0%	10%	5%	1%	0%
PD	En main	22%	3%	1%	0%	19%	7%	1%	0%
	Échauffement	16%	2%	0%	0%	18%	1%	1%	0%
	Palier 1	16%	2%	1%	0%	17%	1%	1%	0%
	Palier 2	18%	1%	0%	0%	16%	1%	2%	0%
	Palier 3	17%	2%	0%	0%	12%	3%	0%	1%

Aucune tendance ne se dégage lorsque l'on compare les pourcentages de boiteries entre les entraîneurs.

4) Répétabilité des mesures

Les pourcentages des grades de boiteries, tous membres confondus sont répartis dans le tableau suivant, en séparant les évaluations par date.

Tableau 6 : Répartition des pourcentages de membres boiteux par grade de boiterie en fonction des dates d'évaluation

	Grade de boiterie							
	0		1		2		3	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
J0	70,5%	18,4	19,75%	16,2	8,5%	4,6	0,25%	0,5
J30	74%	11,5	17%	10	4,5%	5,7	0,25%	0,5
J60	71,3%	17,6	22,3%	17,3	8%	1,4	0%	0

Quel que soit le jour de l'évaluation, les pourcentages des membres boiteux des grades 0 à 2 restent relativement proches. Les écart-types sont également peu différents à J0 et J60 si ce n'est pour J30 où la dispersion des valeurs est moins importante. Les mesures sont donc répétables au cours du temps.

B. Résultats de l'analyse objective de la locomotion

L'ensemble des résultats de cette partie concerne les évaluations objectives réalisées grâce au Lameness Locator.

1) Détermination d'un seuil de détection de boiterie sur la machine

a) Calcul du seuil pour les membres antérieurs

Le tableau suivant indique les pourcentages de membres non boiteux avec un seuil de 6mm pour les antérieurs et de 3mm pour les postérieurs (Pfau et al. 2014).

Tableau 7 : Répartition des pourcentages de membres non boiteux avec un seuil de 6/3mm

Pieds non boiteux	AG	AD	PG	PD
Seuil 6/3 mm	61%	55%	43%	61%

Ces pourcentages regroupent l'ensemble des évaluations, toutes étapes confondues. En conservant ces seuils, un peu moins de la moitié des trotteurs sont considérés comme boiteux par le Lameness Locator.

En faisant varier de 2mm en 2mm les seuils pour les antérieurs, le pourcentage de membres non boiteux augmente linéairement avec l'augmentation des seuils :

Tableau 8 : Évolution des pourcentages de membres antérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator

Seuil	6	8	10	12	14	16
AG	61%	66%	71%	75%	76%	79%
AD	55%	61%	67%	74%	78%	79%

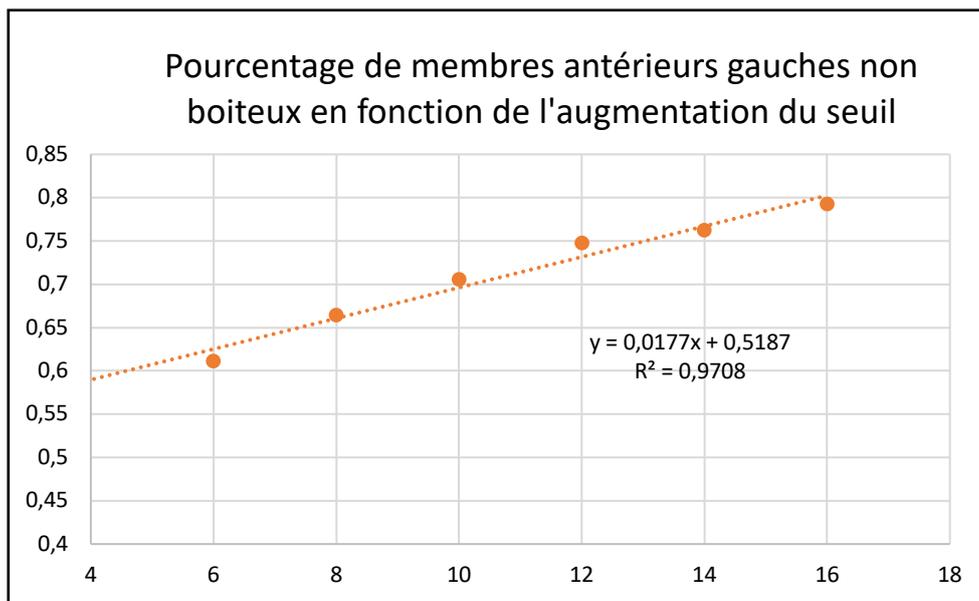


Figure 46 : Représentation graphique des pourcentages de membres antérieurs gauches non boiteux en fonction du seuil du Lameness Locator

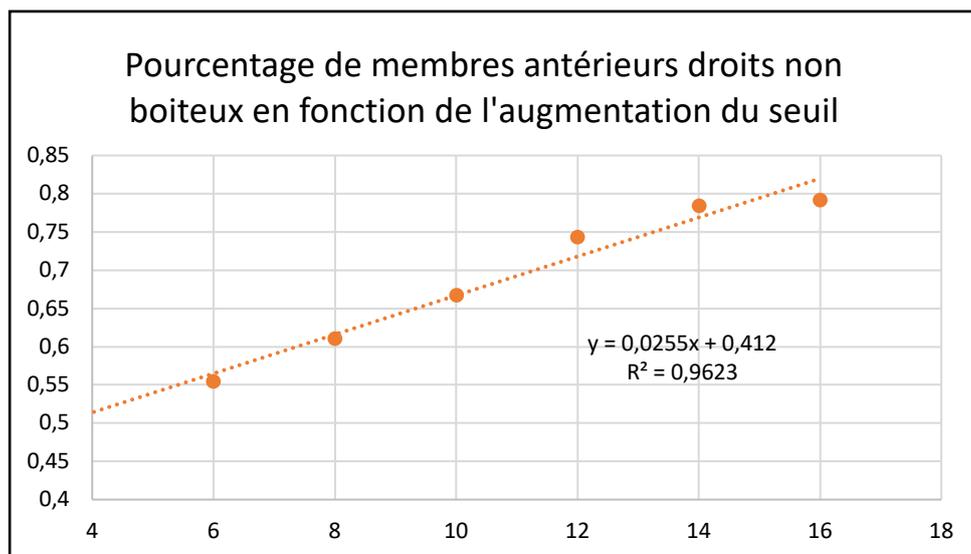


Figure 47 : Représentation graphique des pourcentages de membres antérieurs droits non boiteux en fonction du seuil du Lameness Locator

Les coefficients de corrélation obtenus grâce aux graphiques précédents permettent de conclure en l'existence d'une relation linéaire reliant le pourcentage de membres antérieurs non boiteux avec l'augmentation des seuils du Lameness Locator.

b) Calcul du seuil pour les membres postérieurs

Il est également possible de procéder de la même façon pour les données des membres postérieurs en faisant varier les seuils par unité comme présenté dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 9 : Évolution des pourcentages de membres postérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator

Seuil	3	4	5	6	7	8
PG	43%	48%	58%	61%	65%	72%
PD	61%	68%	75%	80%	82%	85%

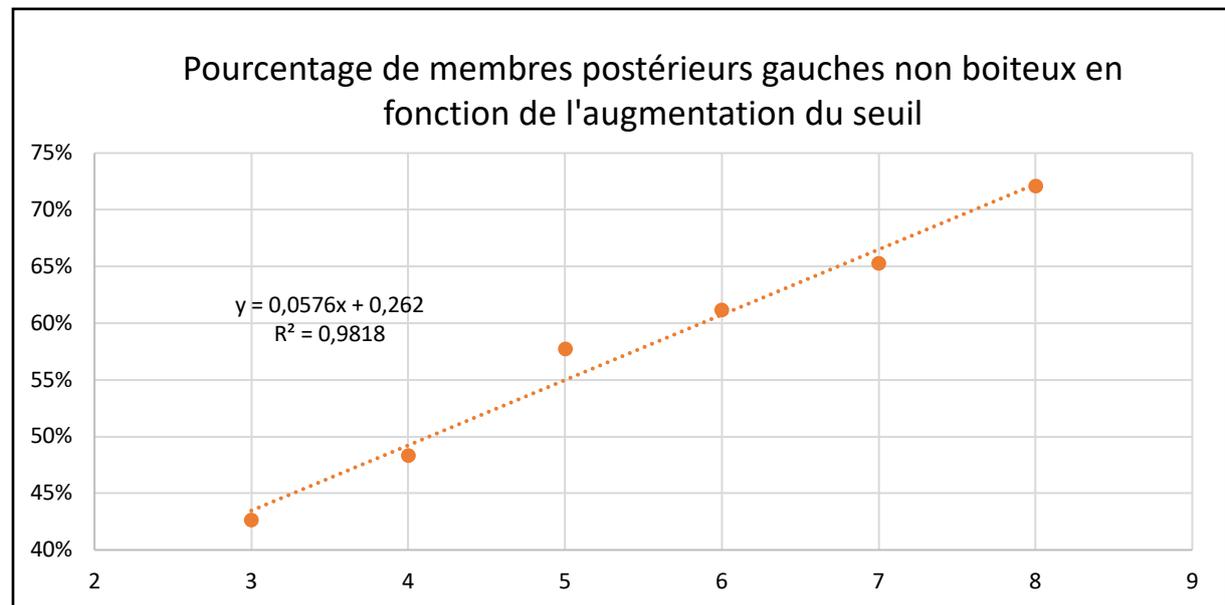


Figure 48 : Représentation graphique des pourcentages de membres postérieurs gauches non boiteux en fonction du seuil du Lameness Locator

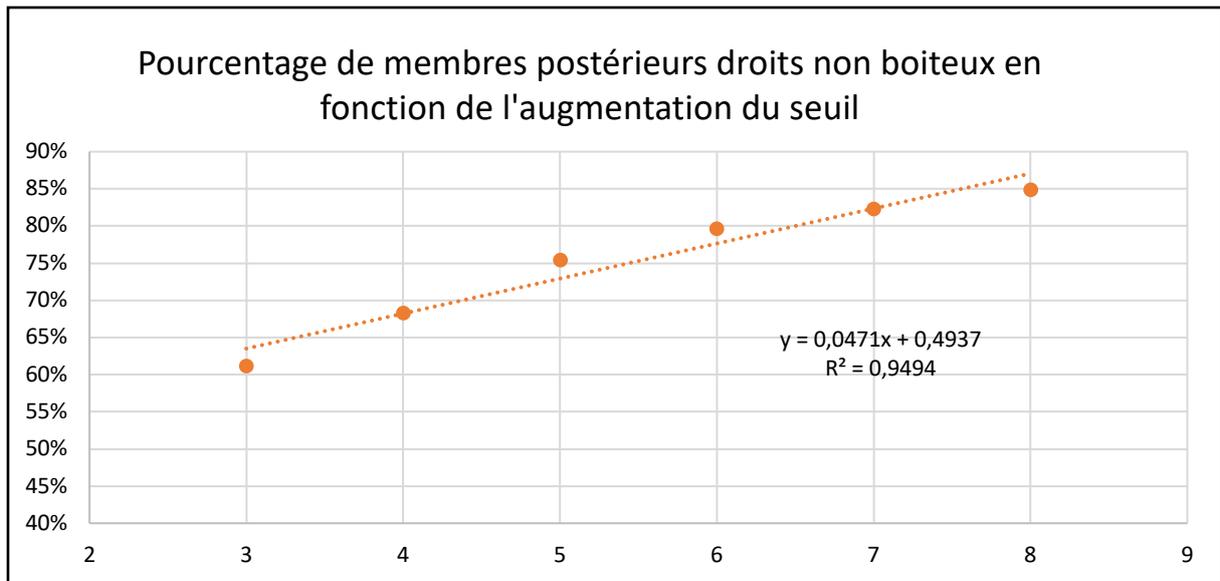


Figure 49 : Représentation graphique des pourcentages de membres postérieurs droits non boiteux en fonction du seuil du Lameness Locator

Comme démontré précédemment avec les membres antérieurs, il existe une relation linéaire reliant le pourcentage de membres non boiteux postérieurs avec l'augmentation des seuils du Lameness Locator.

En revanche, il existe une plus grande différence entre les pourcentages pour les membres postérieurs droit et gauche contrairement aux pourcentages obtenus pour les antérieurs qui sont relativement proches.

Bilan : Les relations linéaires établies entre le pourcentage de boiterie et les seuils choisis pour les mesures de la machine permettent d'adapter l'interprétation des résultats du Lameness Locator en fonction du caractère attelé ou non, et de la vitesse à l'attelage.

c) Méthode du « Gold Standard »

Afin d'adapter les seuils aux conditions d'évaluation des trotteurs à la piste, considérons à présent que le vétérinaire ne commet pas d'erreur lorsqu'il choisit d'annoncer un grade de 0 à un cheval. Les résultats obtenus subjectivement à partir de l'évaluation du vétérinaire peuvent alors être considérés comme « gold standard ». En faisant la moyenne des membres non boiteux sur l'ensemble des tests, le vétérinaire obtient 72% de chevaux non boiteux.

À partir des relations linéaires obtenues et en choisissant 72% de membres non boiteux, nous obtenons un seuil de 11,7 mm pour les antérieurs et de 6,73 mm pour les postérieurs. Ces résultats permettent donc de définir les seuils de 12 mm pour les membres antérieurs et 7 mm pour les membres postérieurs lors de l'évaluation de trotteurs en main et attelés à grande vitesse.

d) Choix des seuils antérieurs en fonction de la vitesse

i) Seuil pour l'antérieur gauche

Le tableau suivant regroupe les pourcentages de membres antérieurs gauches non boiteux en fonction du palier de vitesse et des seuils du Lameness Locator.

Tableau 10 : Évolution des pourcentages de membres antérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator et des paliers de vitesse

Seuil	6	8	10	12	14	16
En main	61%	63%	66%	69%	70%	70%
Échauffement	67%	74%	74%	73%	73%	78%
Palier 1	64%	67%	72%	78%	78%	84%
Palier 2	50%	58%	70%	74%	78%	80%
Palier 3	64%	71%	73%	82%	84%	89%

Les graphiques suivants représentent pour le premier, l'évolution du pourcentage de membres antérieurs gauches non boiteux à chaque palier de vitesse et pour le deuxième, les courbes de tendance correspondantes.

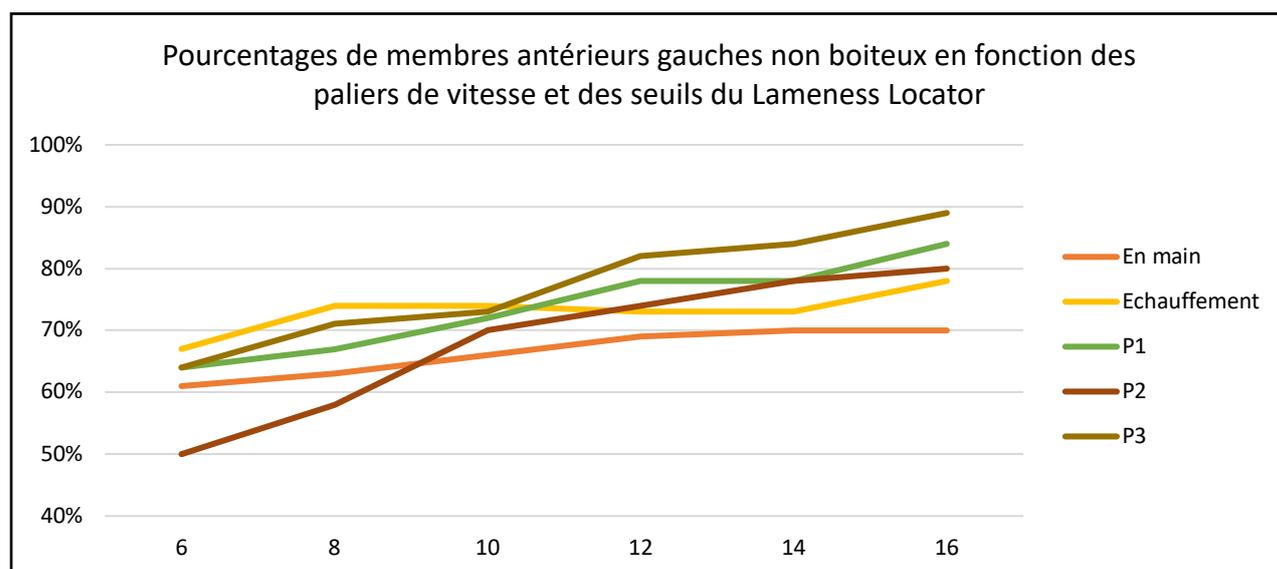


Figure 50 : Représentation graphique des pourcentages de membres antérieurs gauches non boiteux en fonction des paliers de vitesses

L'augmentation des seuils de détection de la machine est liée à une augmentation du pourcentage de membres non boiteux sur l'ensemble des paliers. Si à l'échauffement, cette amélioration est peu marquée, elle l'est cependant beaucoup plus pour les paliers ; 1, 2 et 3. Il est également possible d'observer une inflexion du pourcentage de membres non boiteux lorsqu'on atteint un seuil de 12 mm aux paliers 1, 3 et en main : passé ce seuil, la pente des courbes est moins importante.

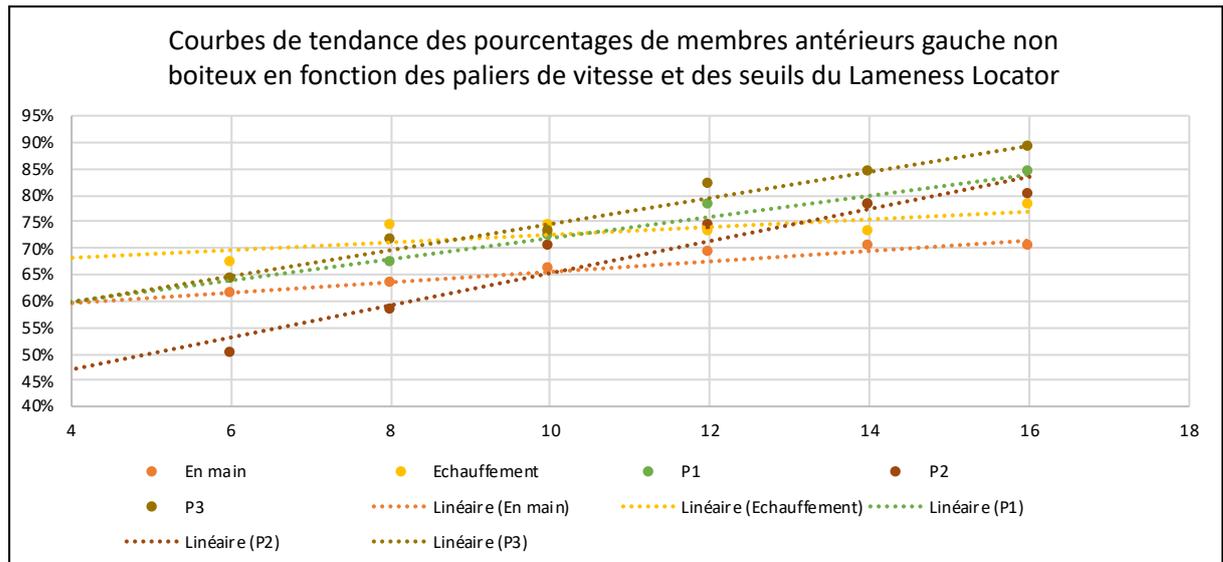


Figure 51 : Représentation graphique des courbes de tendance des pourcentages de membres antérieurs gauches non boiteux en fonction des paliers de vitesses

Le tableau suivant regroupe les données obtenues à partir des équations linéaires du graphique précédent pour l'antérieur gauche.

À partir de l'équation de la courbe de tendance, on calcule le seuil y pour lequel on obtient 72% de membres antérieurs gauches non boiteux.

Tableau 11 : Équations linéaires et calcul des seuils à partir d'un Gold Standard de 72% de membres non boiteux

Palier	Coefficient de corrélation R	Équation linéaire	Seuil à 72% de membres non boiteux
En main	0,96	$y = 0,0099x + 0,5566$	16,5
Échauffement	0,77	$y = 0,0073x + 0,6515$	9,38
Palier 1	0,98	$y = 0,0199x + 0,5199$	10,05
Palier 2	0,96	$y = 0,0306x + 0,347$	12,18
Palier 3	0,98	$y = 0,0247x + 0,5004$	8,89

Le coefficient de corrélation R est relativement proche de 1 pour l'ensemble des paliers, excepté à l'échauffement, ce qui traduit l'existence d'une relation linéaire reliant le pourcentage de membres antérieurs gauches non boiteux et l'augmentation des seuils de la machine. Il est donc justifié de pouvoir calculer un seuil de machine pour un pourcentage de membres non boiteux donné.

À l'échauffement, le coefficient de corrélation R est beaucoup plus faible. Dans ce cas, l'absence de relation linéaire empêche le calcul d'un seuil de machine correct.

ii) Seuil pour l'antérieur droit

En réitérant la même démarche statistique pour l'antérieur droit, le tableau suivant regroupe les pourcentages de membres antérieurs droits non boiteux en fonction des paliers klm=de vitesse et des seuils du Lameness Locator.

Tableau 12 : Évolution des pourcentages de membres antérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator et des paliers de vitesse

Seuil	6	8	10	12	14	16
En main	63%	70%	73%	79%	82%	83%
Échauffement	49%	57%	63%	71%	73%	78%
Palier 1	52%	60%	68%	72%	78%	80%
Palier 2	56%	56%	66%	74%	78%	84%
Palier 3	53%	58%	60%	73%	80%	82%

En comparant les données du tableau précédent avec celles obtenues pour l'antérieur gauche, on note que les pourcentages de membres non boiteux antérieurs droits sont plus faibles que pour l'antérieur gauche quelles que soit les circonstances. Les chevaux évalués présentent donc plus de boiteries des membres antérieurs droits que des membres antérieurs gauches.

Les graphiques suivants représentent pour le premier, l'évolution du pourcentage de membres antérieurs droits non boiteux à chaque palier de vitesse et pour le deuxième, les courbes de tendance correspondantes.

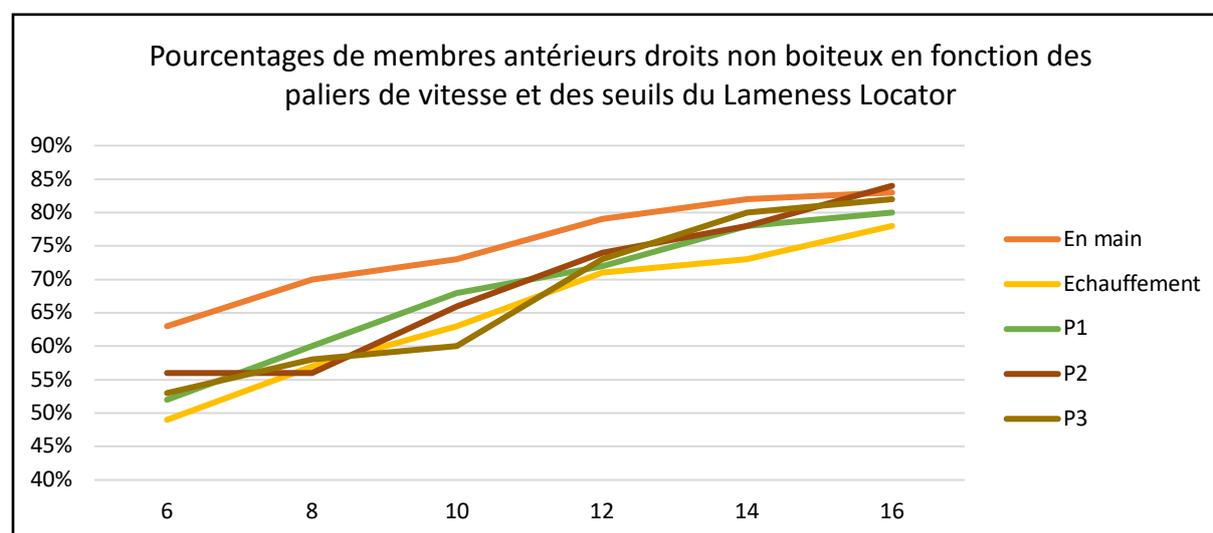
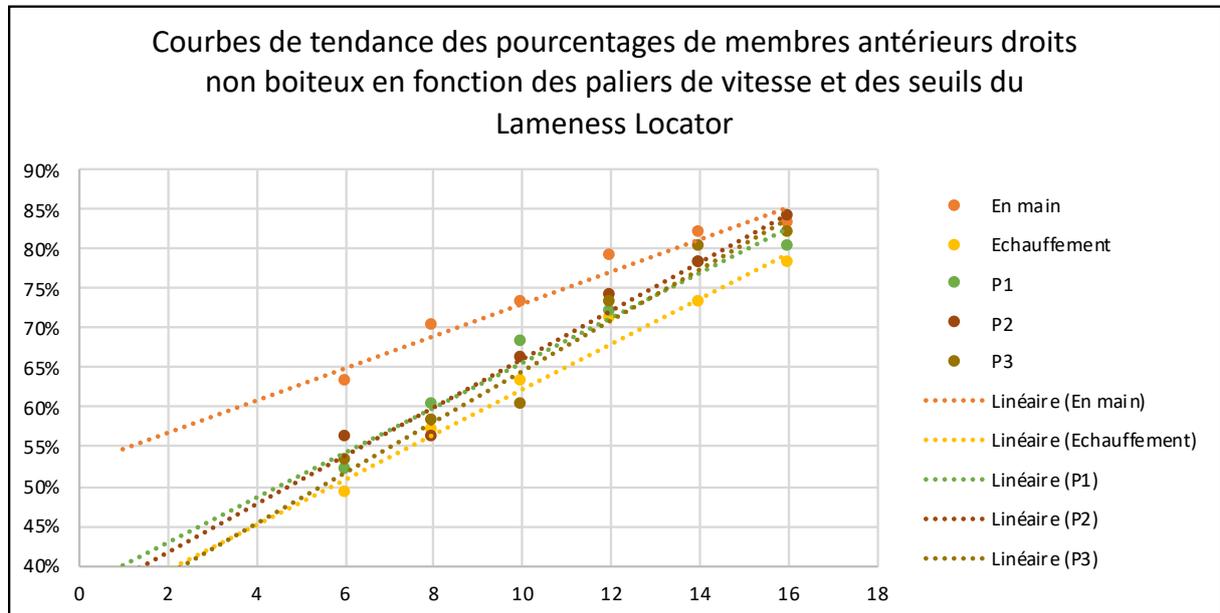


Figure 52 : Représentation graphique des pourcentages de membres antérieurs droits non boiteux en fonction des paliers de vitesses

Tout comme pour l'autre antérieur, l'augmentation des seuils de détection de la machine permet d'augmenter le pourcentage de membres non boiteux sur l'ensemble des

paliers. Une inflexion est également présente à un seuil de 12 mm en main, à l'échauffement et au paliers 3.

À l'exception du test en main, il semble qu'il y ait peu de différence entre les paliers de vitesses pour les pourcentages de membres antérieurs droits non boiteux.



Le tableau suivant regroupe les données obtenues à partir des équations linéaires du graphique précédent.

Tableau 13 : Équations linéaires et calcul des seuils à partir d'un Gold Standard de 72% de membres non boiteux

Palier	Coefficient de corrélation R	Équation linéaire	Seuil à 72% de membres non boiteux
En main	0,98	$y = 0,0203x + 0,5269$	9,51
Échauffement	0,99	$y = 0,0287x + 0,3358$	13,38
Palier 1	0,98	$y = 0,0283x + 0,3722$	12,28
Palier 2	0,98	$y = 0,0306x + 0,3537$	11,97
Palier 3	0,97	$y = 0,032x + 0,3247$	12,35

Le coefficient de corrélation R est relativement proche de 1 pour l'ensemble des paliers, y compris à l'échauffement, ce qui traduit l'existence d'une relation linéaire reliant le pourcentage de membres antérieurs droits non boiteux et l'augmentation des seuils de la machine.

La faible distinction des pourcentages de membres non boiteux observés sur les courbes précédentes se retrouvent au travers des seuils à 72% : Quel que soit le palier de

vitesse (excepté en main), le seuil de 72% de membres non boiteux se situe environ à 12 mm avec une variation de seuil très légère entre chaque vitesse.

e) Choix des seuils postérieurs en fonction de la vitesse

i) Seuils pour le postérieur gauche

La même démarche statistique est appliquée pour le postérieur gauche. Le tableau suivant regroupe les pourcentages de membres postérieurs gauches non boiteux en fonction du palier de vitesse et des seuils du Lameness Locator.

Tableau 14 : Évolution des pourcentages de membres postérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator et des paliers de vitesse

Seuil	3	4	5	6	7	8
En main	51%	58%	65%	69%	70%	77%
Échauffement	39%	43%	51%	53%	59%	67%
Palier 1	38%	46%	52%	52%	58%	68%
Palier 2	34%	40%	54%	58%	64%	68%
Palier 3	49%	51%	64%	71%	73%	78%

Pour chacun des seuils, les pourcentages de postérieurs gauches non boiteux augmentent entre les paliers 1 à 3. Les chevaux sont donc moins boiteux du postérieur gauche lorsque la vitesse augmente.

Les graphiques suivants représentent pour le premier, l'évolution du pourcentage de membres postérieurs gauches non boiteux à chaque palier de vitesse et pour le deuxième, les courbes de tendance correspondantes.

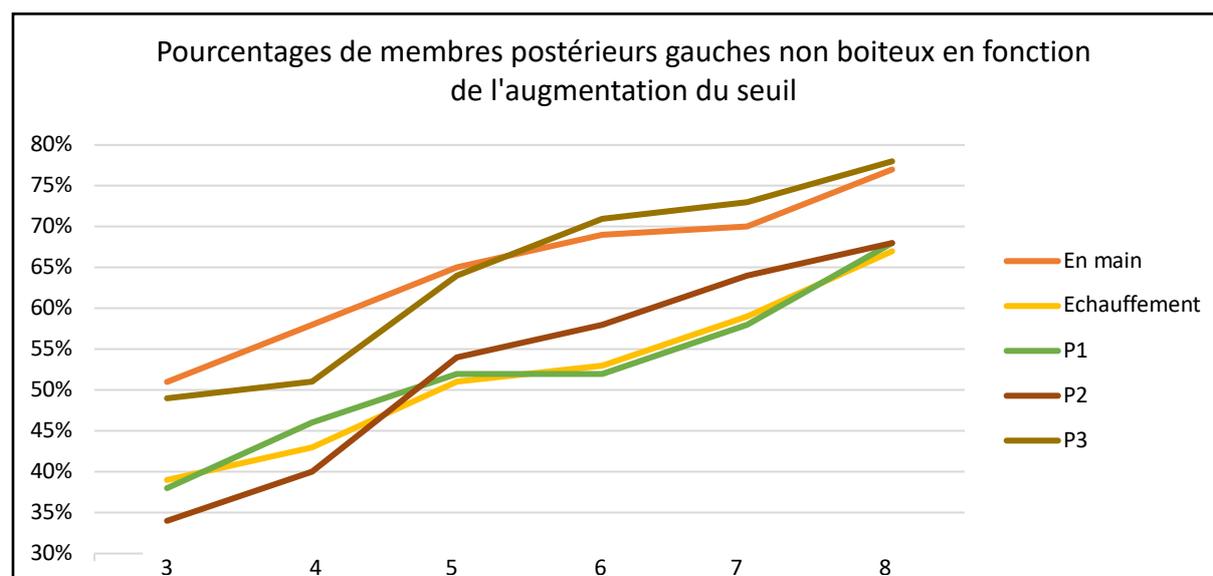


Figure 54 : Représentation graphique des pourcentages de membres postérieurs gauches non boiteux en fonction des paliers de vitesses

L'augmentation des seuils de détection de la machine permet d'augmenter le pourcentage de membres non boiteux sur l'ensemble des paliers. Il semble que pour le postérieur gauche, les chevaux soient moins boiteux en main et au palier 3.

Les courbes présentent toutes une inflexion pour un seuil de 5 mm à partir duquel le pourcentage de membres non boiteux augmente plus lentement.

Le tableau suivant regroupe les données obtenues à partir des équations linéaires du graphique précédent.

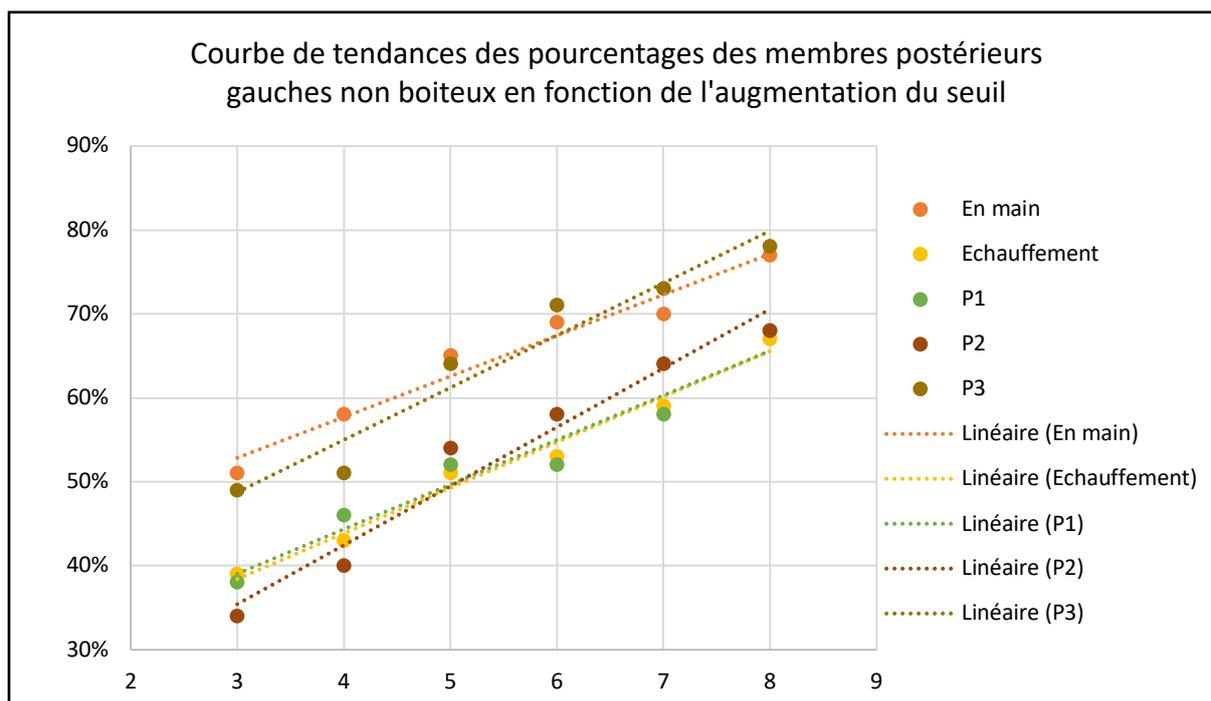


Figure 55 : Représentation graphique des courbes de tendance des pourcentages de membres antérieurs gauches non boiteux en fonction des paliers de vitesses

Tableau 15 : Équations linéaires et calcul des seuils à partir d'un Gold Standard de 72% de membres non boiteux

Palier	Coefficient de corrélation R	Équation linéaire	Seuil à 72% de membres non boiteux
En main	0,98	$y = 0,0486x + 0,3829$	6,94
Échauffement	0,99	$y = 0,0543x + 0,2214$	9,18
Palier 1	0,98	$y = 0,0531x + 0,231$	9,20
Palier 2	0,97	$y = 0,0703x + 0,1434$	8,20
Palier 3	0,97	$y = 0,0623x + 0,3008$	6,73

Le coefficient de corrélation R est relativement proche de 1 pour l'ensemble des paliers ce qui traduit l'existence d'une relation linéaire reliant le pourcentage de membres postérieurs gauches non boiteux et l'augmentation des seuils de la machine.

Les seuils pour l'échauffement et les paliers 1 et 2 sont relativement proches. Il semble également qu'il faille un seuil moindre pour les évaluations en main et au palier 3 pour le postérieur gauche.

ii) Seuil pour le postérieur droit

Le tableau suivant regroupe les pourcentages de membres postérieurs gauches non boiteux en fonction du palier de vitesse et des seuils du Lameness Locator.

Tableau 16 : Évolution des pourcentages de membres postérieurs non boiteux en fonction des seuils du Lameness Locator et des paliers de vitesse

Seuil	3	4	5	6	7	8
En main	59%	70%	76%	80%	83%	86%
Échauffement	73%	78%	80%	80%	80%	80%
Palier 1	62%	68%	76%	82%	86%	88%
Palier 2	54%	64%	76%	82%	86%	88%
Palier 3	58%	60%	69%	73%	76%	82%

Pour chacun des seuils, les pourcentages de postérieurs droits non boiteux diminuent entre les paliers 1 à 3. Les chevaux sont donc d'autant plus boiteux du postérieur droit que la vitesse augmente.

Les graphiques suivants représentent pour le premier, l'évolution du pourcentage de membres postérieurs droits non boiteux à chaque palier de vitesse et pour le deuxième, les courbes de tendance correspondantes.

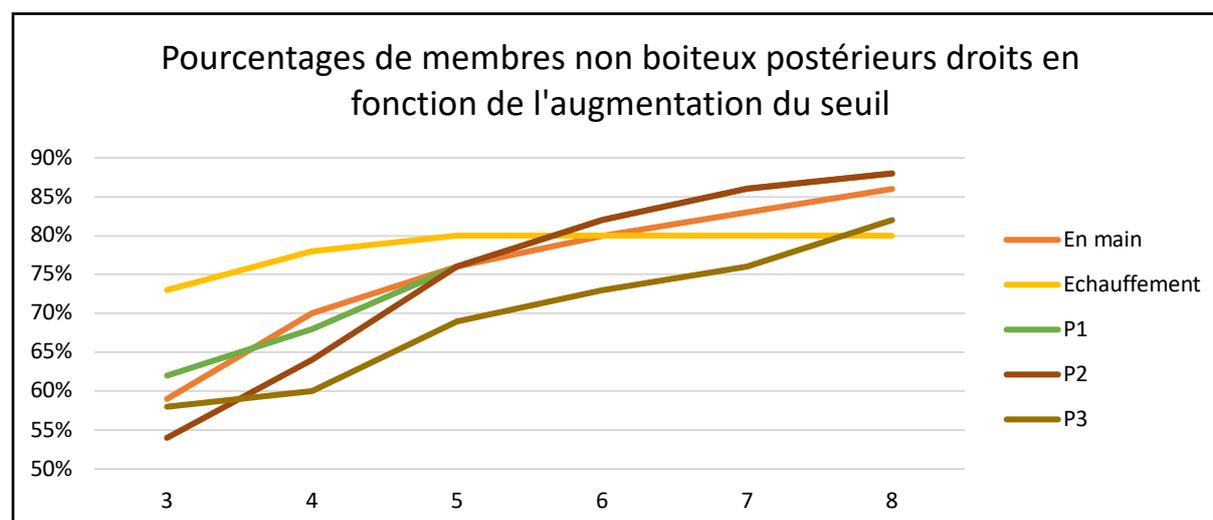


Figure 56 : Représentation graphique des pourcentages de membres postérieurs droits non boiteux en fonction des paliers de vitesses

À nouveau, l'augmentation des seuils de détection de la machine permet d'augmenter le pourcentage de membres non boiteux sur l'ensemble des paliers sauf à l'échauffement. Une inflexion est présente à un seuil de 5 mm aux paliers 2 et 3.

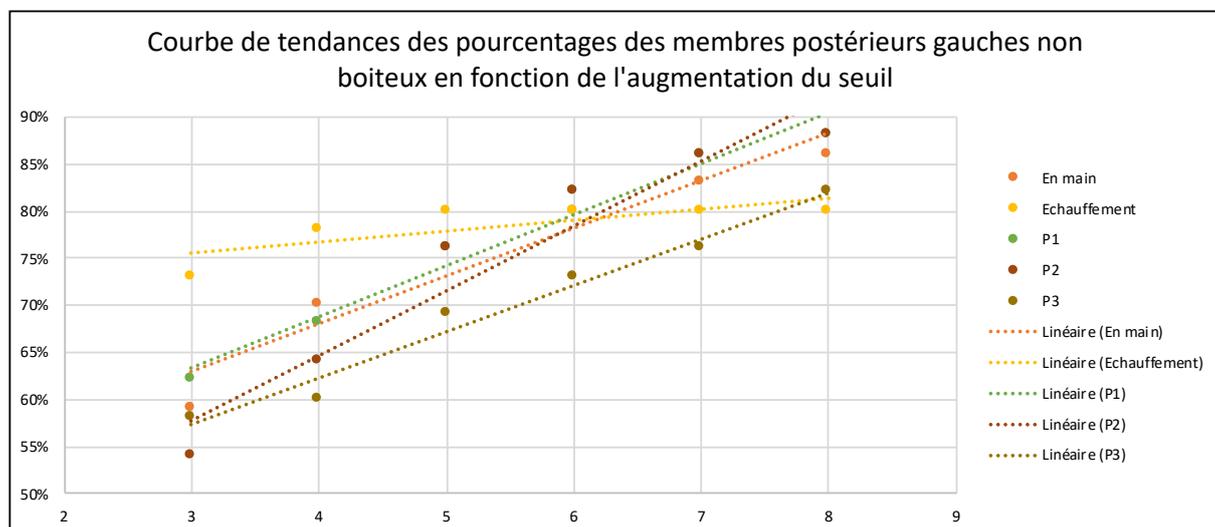


Figure 57 : Représentation graphique des pourcentages de membres postérieurs gauches non boiteux en fonction des paliers de vitesses

Le tableau suivant regroupe les données obtenues à partir des équations linéaires du graphique précédent.

Tableau 17 : Équations linéaires et calcul des seuils à partir d'un Gold Standard de 72% de membres non boiteux

Palier	Coefficient de corrélation R	Équation linéaire	Seuil à 72% de membres non boiteux
En main	0,93	$y = 0,0509x + 0,477$	4,77
Échauffement	0,61	$y = 0,0117x + 0,7206$	-0,05
Palier 1	0,97	$y = 0,0543x + 0,4714$	4,58
Palier 2	0,93	$y = 0,0691x + 0,3697$	5,07
Palier 3	0,98	$y = 0,0491x + 0,4264$	5,98

Le coefficient de corrélation linéaire à l'échauffement montre l'absence de relation linéaire entre les pourcentages de boiteries et le seuil de la machine. Pour les autres paliers, les seuils oscillent autour de 5 mm et augmentent entre les paliers 1 à 3.

f) Bilan sur le choix des seuils du Lameness Locator

Le tableau suivant récapitule les seuils choisis comme significatifs pour les résultats de la machine correspondant à un pourcentage de membres non boiteux de 72% pour chacun des membres.

Tableau 18 : Répartition des seuils du Lameness Locator à partir d'un Gold Standard de 72% de membres non boiteux

	AG	AD	PG	PD
En main	16,50	9,51	6,94	4,77
Échauffement	9,38	13,38	9,18	-0,05
Palier 1	10,05	12,29	9,21	4,58
Palier 2	12,19	11,97	8,20	5,07
Palier 3	8,89	12,35	6,73	5,98

Dans le cadre de cette étude, il est donc possible de définir un seuil global pour les antérieurs et pour les postérieurs en calculant une moyenne sur l'ensemble des évaluations mais pas de définir un seuil ni une tendance pour chaque vitesse.

Pour la suite de l'étude, des seuils de 12mm pour les antérieurs et de 7mm pour les postérieurs sont choisis.

2) Dispersion des valeurs de la machine

a) Dispersion de H DIFF MAX, H DIFF MIN, P DIFF MAX, P DIFF MIN

À partir des données obtenues lors des évaluations avec le Lameness Locator, une étude statistique de dispersion des données a été réalisée.

Le tableau et le graphique suivants regroupent l'ensemble des données sous forme de boîtes de dispersion selon les valeurs de H DIFF MAX, H DIFF MIN, P DIFF MAX et P DIFF MIN indiquées par le Lameness Locator.

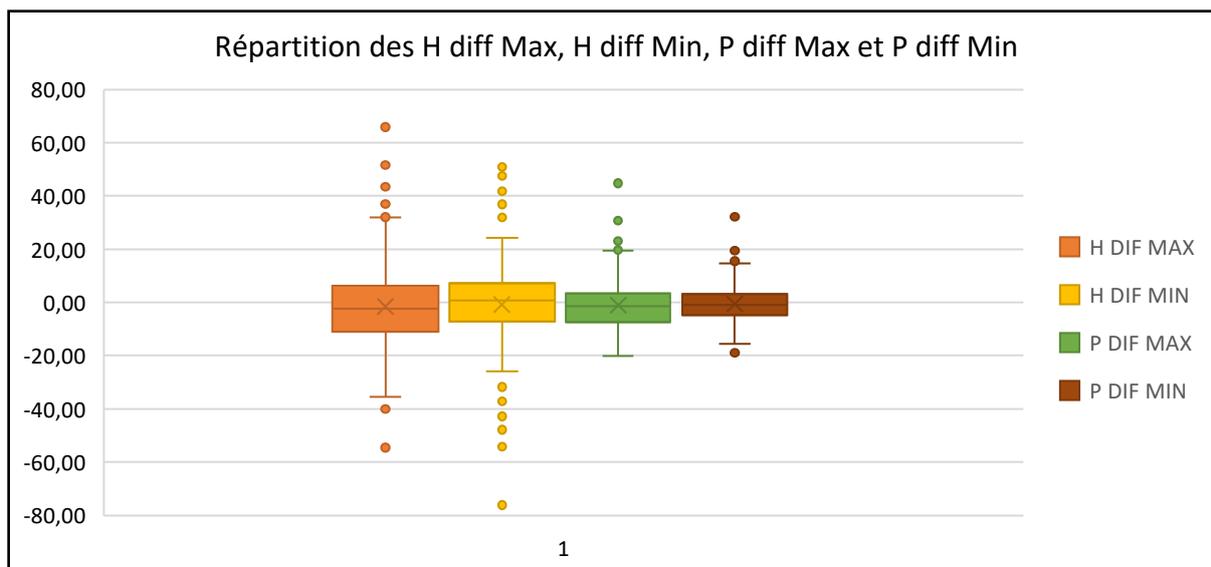


Figure 58 : Représentation graphique de la dispersion des valeurs H diff Max, H diff Min, P diff Max et P diff Min

L'écart absolu moyen correspond à la moyenne des valeurs absolues des différences entre les observations et leur moyenne. Ce paramètre permet d'indiquer à quelle distance se trouve, en moyenne, les valeurs par rapport à la moyenne globale des évaluations.

Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type à la moyenne. Ainsi, plus sa valeur est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est importante.

L'étendue est calculée par la différence entre la valeur maximale et minimale pour chaque paramètre.

Tableau 19 : Résultats des études de dispersion de H diff Max, H diff Min, P diff Max et P diff Min réalisées sur l'ensemble des évaluations

Valeurs	H diffMax	H diff Min	P diff Max	P diff Min
Moyenne	-1,37	-0,83	-1,04	-0,57
Médiane	-2,43	0,70	-1,40	-0,95
Q1	-11,10	-7,10	-7,43	-4,80
Q3	6,05	7,23	3,23	3,03
Q1-Q3	17,15	14,33	10,65	7,83
Variance	422,36	269,95	83,03	43,04
Écart-type	20,68	16,50	9,13	6,59
Écart absolu moyen	12,81	11,11	6,68	4,96
Coefficient de variation	-14,50	-19,96	-8,78	-11,56
Étendue	257,50	129,80	64,80	51,10

Membres antérieurs :

- L'écart entre la moyenne et la médiane est négatif pour H DIF MAX et H DIF MIN.
- La différence des quartiles Q1-Q3 est plus importante sur le paramètre H DIFF MAX que sur le paramètre H DIFF MIN.
- L'écart-type et l'écart absolu à la moyenne sont également plus élevés sur le paramètre H DIFF MAX par rapport à H DIFF MIN. La dispersion des valeurs est donc plus marquée sur H DIFF MAX.
- L'étendue de H DIFF MAX est plus élevée que celle de H DIFF MIN. Les valeurs aberrantes correspondant à des déconnexion de capteurs ou à un comportement inadéquat du cheval.

Membres postérieurs :

- L'écart entre la moyenne et la médiane est négatif pour P DIF MAX et P DIF MIN.
- La différence des quartiles Q1-Q3 est nettement plus importante sur le paramètre P DIFF MAX que sur le paramètre P DIFF MIN.
- L'écart-type et l'écart absolu à la moyenne sont également plus élevés sur le paramètre P DIFF MAX par rapport à P DIFF MIN. La dispersion des valeurs est donc nettement plus marquée sur P DIFF MAX.
- L'étendue de P DIFF MAX est également plus élevée que celle de P DIFF MIN.

Bilan :

L'étude de dispersion sur ces 4 variables montre que la dispersion des valeurs est moins importante pour H DIFF MIN et P DIFF MIN par rapport à H DIFF MAX et P DIFF MAX. Les chevaux semblent varier moins leurs mouvements de tête et de bassin vers le bas que vers le haut. Cette donnée est intéressante pour le vétérinaire qui a intérêt dans ce cas présent à analyser les mouvements de tête et de bassin vers le haut.

b) Dispersion des valeurs de la machine en fonction des paliers de vitesses

Les tableaux et graphiques suivants reprennent les paramètres de dispersion étudiés plus tôt, sur chacun des paliers de vitesses.

Pour les antérieurs :

Tableau 20 : Résultats des études de dispersion de H diff Max et H diff Min en fonction des paliers de vitesses

Variable	H DIFF MAX					H DIFF MIN				
	M	E	P1	P2	P3	M	E	P1	P2	P3
Moyenne	-2,99	4,85	-1,25	-2,6	-4,76	-3,62	0,10	0,66	-0,51	0,59
Médiane	-1,7	0,1	-2,6	-7,1	-3,8	-0,2	1,3	1,55	0,15	1,35
Q1	-10,60	-10,70	-10,58	-11,73	-11,85	-17,03	-5,40	-6,58	-6,40	-5,30
Q3	4,20	6,60	8,08	8,23	3,78	6,70	7,40	7,48	7,05	6,85
Q1-Q3	-14,80	-17,30	-18,65	-19,95	-15,63	23,73	12,80	14,05	13,45	12,15
Variance	195,16	1204,86	275,59	260,13	208,16	708,66	138,54	108,68	94,55	72,73
Écart-type	13,97	34,71	16,60	16,13	14,43	26,62	11,77	10,42	9,72	8,53
Écart absolu moyen	10,63	17,75	12,78	12,98	11,12	19,15	9,31	8,54	8,10	7,08
Coefficient de variation	-4,68	7,15	-13,22	-6,20	-3,03	-7,35	111,99	15,70	-19,03	14,38
Étendue	76	241,4	86,6	77	63,6	129,8	45,75	47,6	41,3	37,1

H DIFF MAX :

- L'évaluation en main semble intéressante à réaliser tout de même car les paramètres de dispersion de H DIFF MAX à cette allure sont intermédiaires et aussi élevés que lors d'une évaluation attelée entre 36 et 40 km/h.
- A l'échauffement, l'ensemble des paramètres de dispersion de H DIFF MAX sont très nettement élevés par rapport aux autres paliers de vitesse. Les chevaux semblent donc moins réguliers à cette allure.
- Les paramètres de dispersion (variance, écart-type, coefficient de variation, étendue) diminuent avec l'augmentation de la vitesse entre les paliers 1 et 3 pour H DIFF MAX.

Le coefficient de variation diminue même de moitié avec le passage de chacun des paliers. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus les mouvements de tête vers le haut se régularisent et diminuent en amplitude.

H DIFF MIN :

- La différence des quartiles Q1-Q3 diminue avec l'augmentation de la vitesse entre les paliers P1 à P3. Elle est liée à une augmentation du premier quartile et une diminution du 3^{ème} quartile. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus l'écart entre les valeurs se resserre autour de la médiane.
- Les paramètres de dispersion (variance, écart-type, écart absolu moyen) diminuent avec l'augmentation de la vitesse. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus les mouvements de tête vers le bas se régularisent et diminuent en amplitude. Les valeurs sont nettement plus élevées en main sur l'ensemble de ces paramètres.
- L'étendue des valeurs diminue entre les paliers 1 à 3. Les tests en main révèlent une forte étendue.

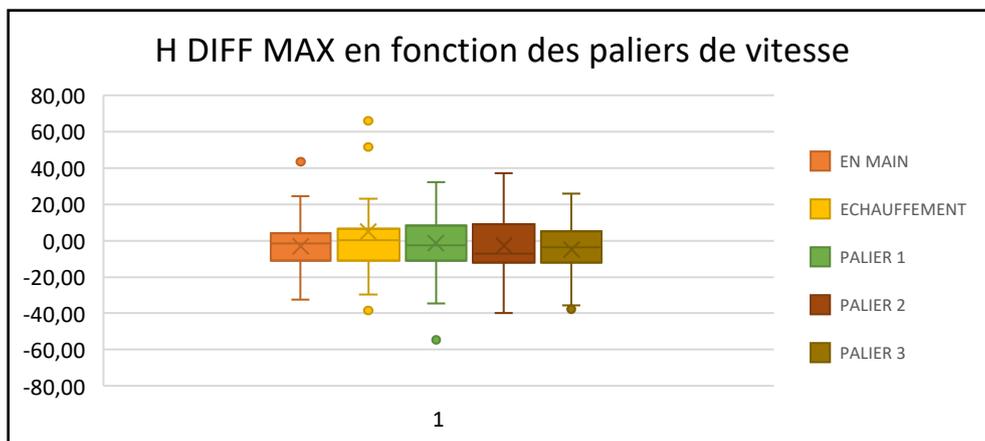


Figure 59 : Représentation graphique de la dispersion des valeurs H diff Max en fonction des paliers de vitesses

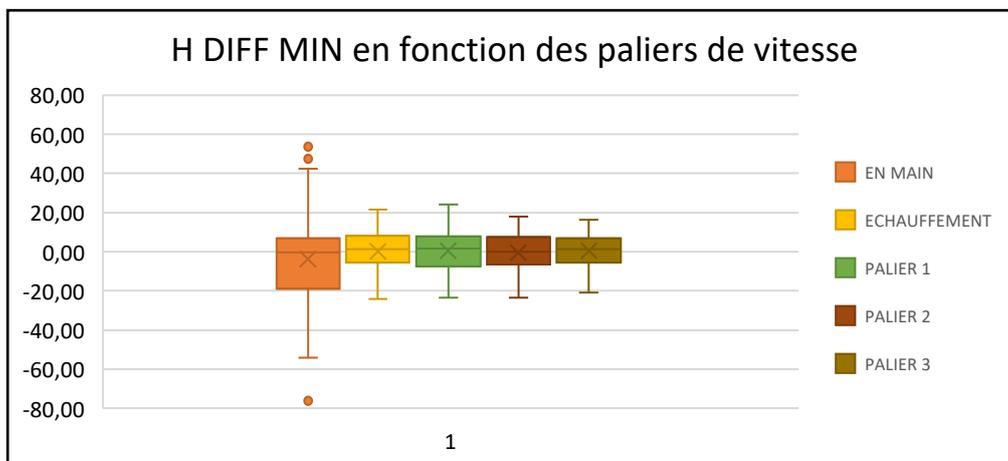


Figure 60 : Représentation graphique de la dispersion des valeurs H diff Min en fonction des paliers de vitesses

Bilan :

L'étude de dispersion des valeurs de H DIFF MAX et H DIFF MIN aux différents paliers de vitesses révèle que :

- En main, la dispersion des valeurs de H DIFF MIN est plus importante que celle de H DIFF MAX.
- A grande vitesse, la dispersion des valeurs de H DIFF MAX est plus importante que celle de H DIFF MIN.
- On note par ailleurs que plus la vitesse augmente et plus la dispersion des valeurs de H DIFF MIN diminue.

Les chevaux régularisent progressivement leur mouvement de tête vers le bas avec l'augmentation de la vitesse. En main, il semble donc plus intéressant d'étudier les mouvements de tête vers le bas alors qu'à grande vitesse, les mouvements de tête vers le haut seraient plus indicatifs d'une boiterie.

Pour les postérieurs :

Tableau 21 : Résultats des études de dispersion de P diff Max et P diff Min en fonction des paliers de vitesses

Variable	P DIFF MAX					P DIFF MIN				
	M	E	P1	P2	P3	M	E	P1	P2	P3
Moyenne	-0,74	-1,61	-1,70	-0,78	-0,44	-0,44	-1,02	-0,86	-0,70	0,21
Médiane	-0,70	-3,80	-3,30	-2,20	-0,95	-0,60	-1,20	-2,25	-0,30	-0,15
Q1	-4,00	-8,20	-8,35	-7,63	-5,40	-5,40	-5,00	-4,58	-4,81	-2,68
Q3	3,05	3	2,85	3,3	4,25	2,9	0,8	3,925	3,65	3,325
Q1-Q3	7,05	11,20	11,20	10,93	9,65	8,30	5,80	8,50	8,46	6,00
Variance	34,61	132,86	75,20	84,16	111,81	45,04	73,09	35,90	32,38	25,61
Écart-type	5,88	11,52	8,67	9,17	10,57	6,71	8,55	5,99	5,69	5,06
Écart absolu moyen	4,52	7,84	6,88	7,09	7,90	5,19	5,57	4,89	4,77	4,03
Coefficient de variation	-8,00	-7,15	-5,08	-11,80	-24,10	-11,78	-5,45	-5,67	-6,82	19,49
Étendue	28,7	64,8	41,6	38,85	50,4	33	51,1	26,7	24,6	22,5

P DIFF MAX :

- La moyenne et la médiane sont négatives quel que soit le palier de vitesse considéré. Les chevaux présentent donc plus souvent une boiterie du postérieur gauche. D'autre part, ces deux variables sont plus faibles à l'échauffement et au palier 1. Ainsi, les chevaux sont moins réguliers à ces vitesses-là.
- Les paramètres de dispersion (variance, écart-type, coefficient de variation) augmentent avec l'augmentation de la vitesse. Plus la vitesse augmente et plus les mouvements de bassin vers le haut augmentent en amplitude.
- La différence Q1-Q3 diminue avec l'augmentation de la vitesse une fois les chevaux attelés. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus l'écart entre les valeurs se resserre autour de la médiane.

P DIFF MIN :

- La moyenne et la médiane sont négatives quel que soit le palier de vitesse considéré. Les chevaux présentent donc plus souvent une boiterie du postérieur gauche. D'autre part, ces deux variables sont plus faibles à l'échauffement et au palier 1. Ainsi, les chevaux sont moins réguliers à ces vitesses-là.
- La différence des quartiles Q1-Q3 diminue avec l'augmentation de la vitesse entre les paliers P1 à P3. Elle est liée à une augmentation du premier quartile et une diminution du 3^{ème} quartile. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus l'écart entre les valeurs se resserre autour de la médiane.
- Les paramètres de dispersion (variance, écart-type, écart absolu moyen, étendue) diminuent avec l'augmentation de la vitesse. Ainsi, plus la vitesse augmente et plus les mouvements de bassin, vers le bas, diminuent en amplitude.

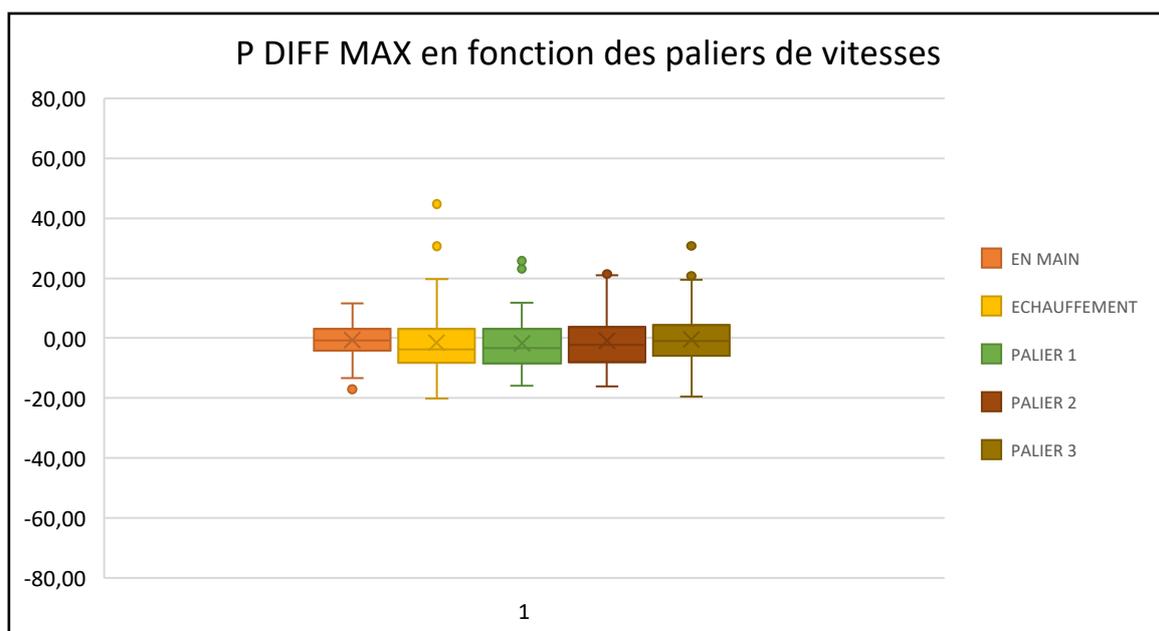


Figure 61 : Représentation graphique de la dispersion des valeurs P diff Max en fonction des paliers de vitesses

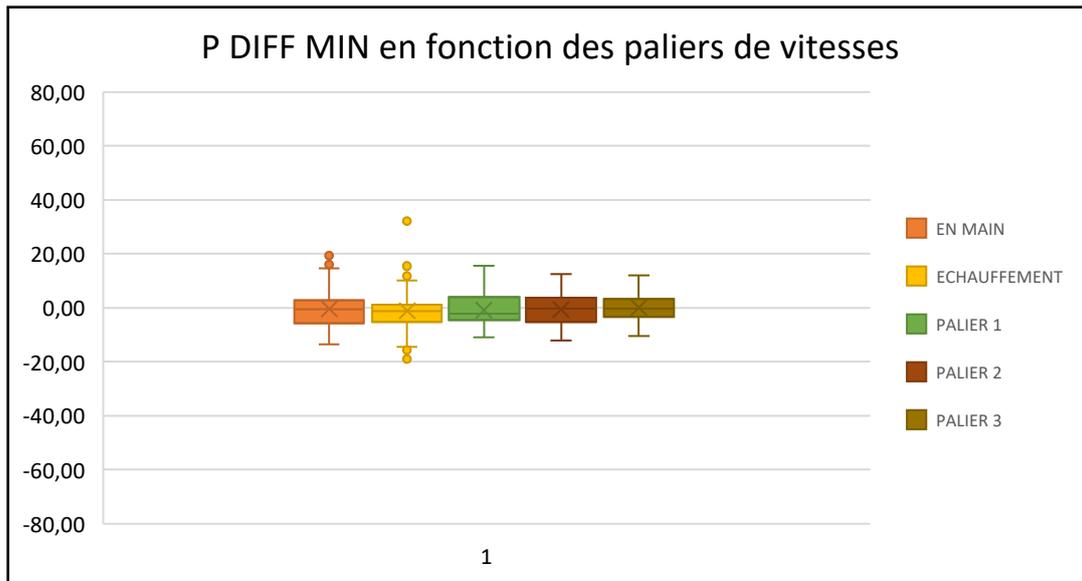


Figure 62 : Représentation graphique de la dispersion des valeurs P diff Max en fonction des paliers de vitesses

Bilan :

L'étude de dispersion des valeurs de P DIFF MAX et P DIFF MIN aux différents paliers de vitesse révèle que :

- En main, la dispersion des valeurs de P DIFF MIN est plus importante que celle de P DIFF MAX.
- À grande vitesse, la dispersion des valeurs de P DIFF MAX est plus importante que celle de P DIFF MIN.
- Les chevaux étudiés présentent à majorité une boiterie du membre postérieur gauche.

En main, les chevaux présentent des mouvements de bassin vers le bas plus amples alors qu'attelés, ce sont les mouvements de bassin vers le haut qui augmentent en amplitude.

3) Influence de la vitesse sur le type de boiterie (impact ou poussée)

Le Lameness Locator permet de distinguer les boiteries d'impact et de poussée. Le tableau suivant représente les types de boiterie des membres antérieurs en fonction de la vitesse du cheval. L'échantillon sélectionné correspond à l'ensemble des chevaux présentant une boiterie antérieure ou postérieure.

Tableau 22 : Répartition des types de boiteries antérieures en fonction des paliers de vitesses

	Boiterie d'impact		Boiterie de poussée	
	AG	AD	AG	AD
En main	82%	73%	18%	27%
Échauffement	23%	29%	77%	71%
Palier 1	55%	43%	45%	57%
Palier 2	39%	15%	61%	85%
Palier 3	50%	33%	50%	77%

Lorsque les chevaux sont évalués en main, ils présentent majoritairement une boiterie d'impact. Une fois attelés, les chevaux présentent en grande majorité une boiterie de poussée, et ce, quel que soit le palier de vitesse considéré.

Le graphique suivant permet de visualiser la répartition des types de boiteries en fonction de l'exercice. Les trois paliers de vitesse lors des examens attelés sont regroupés.

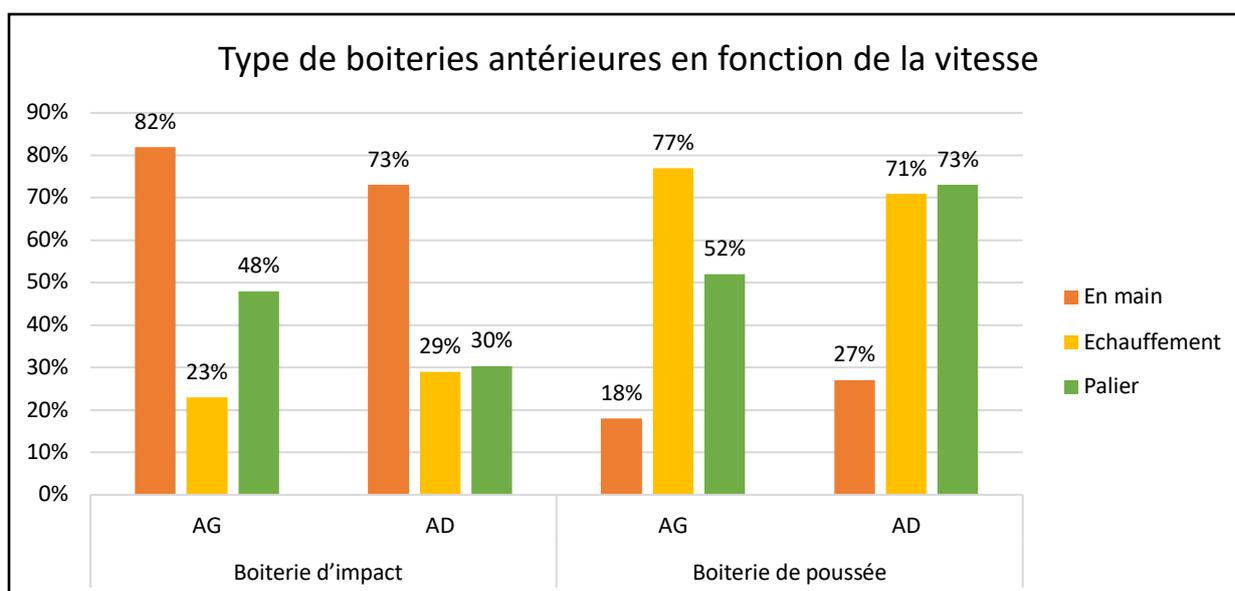


Figure 63 : Représentation graphique des types de boiteries antérieures en fonction des paliers de vitesses

La validation statistique des résultats est effectuée par une série de tests χ^2 . Les p-values pour chacun des tests sont indiquées dans le tableau suivant lorsqu'elles sont inférieures à 0,05.

Tableau 23 : Résultats des calculs de p-value par un test du χ^2 sur les types de boiteries antérieures en fonction des paliers de vitesses

AG		AD	En main		Échauffement		Paliers (1 à 3)	
			Impact	Poussée	Impact	Poussée	Impact	Poussée
En main	Impact		0,005	-				
	Poussée		-	0,050				
Échauffement	Impact				-	-		
	Poussée				-	0,017		
Paliers (1 à 3)	Impact						-	0,007
	Poussée						0,036	0,043

Le calcul des p-value valide la prédominance des boiteries d'impact en main, plus marquées sur l'antérieur gauche que sur l'antérieur droit. De même, lorsque les chevaux sont attelés, ce sont les boiteries de poussée qui prédomine.

En procédant de la même manière, le tableau suivant représente le type de boiterie des membres postérieurs en fonction de la vitesse du cheval.

Tableau 24 : Répartition des types de boiteries postérieures en fonction des paliers de vitesses

	Boiterie d'impact		Boiterie de poussée		Boiterie d'impact et poussée	
	PG	PD	PG	PD	PG	PD
En main	47%	42%	29%	33%	24%	25%
Échauffement	15%	20%	60%	40%	25%	40%
Palier 1	19%	14%	62%	29%	19%	57%
Palier 2	28%	14%	61%	43%	11%	43%
Palier 3	16%	27%	17%	55%	67%	18%

Les chevaux présentent en majorité une boiterie d'impact lors des évaluations en main. Une fois attelés, ce sont les boiteries de poussée puis les boiteries mixtes d'impact et de poussée qui dominent.

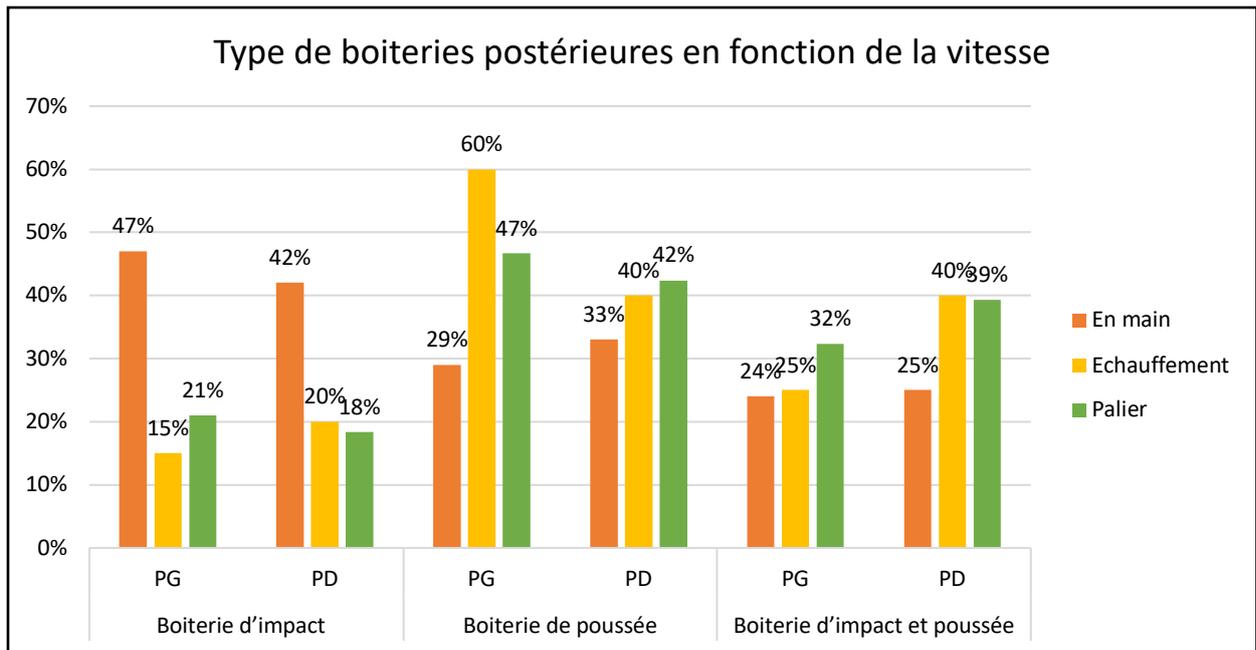


Figure 64 : Représentation graphique des types de boîtiers postérieures en fonction des paliers de vitesses

De la même façon que pour les membres antérieurs, le tableau suivant représente les calculs de p-value par le test χ^2 .

Tableau 24 : Résultats des calculs de p-value par un test du χ^2 sur les types de boîtiers antérieures en fonction des paliers de vitesses

PG	PD	En main			Échauffement			Paliers (1 à 3)		
		Impact	Poussée	Mixte	Impact	Poussée	Mixte	Impact	Poussée	Mixte
En main	Impact	-	0,045	-						
	Poussée	0,023	-	-						
	Mixte	0,013	-	-						
Échauffement	Impact				-	0,024	0,02			
	Poussée				0,012	-	-			
	Mixte				-	0,040	-			
Paliers (1 à 3)	Impact							-	-	-
	Poussée							0,047	0,012	0,02
	Mixte							0,047	-	-

Le test de χ^2 valide certaines des observations précédentes : les boiteries mixtes sont moins représentées que les boiteries de poussée, mais plus fréquentes que les boiteries d'impact sur les postérieurs.

4) Influence des pistes sur l'évolution du type de boiterie

Le tableau suivant compare les boiteries enregistrées par le Lameness Locator chez chacun des deux entraîneurs afin de dégager l'impact des pistes d'entraînement sur les boiteries. Les données collectées concernent uniquement les paliers de vitesses 1 à 3 lorsque les chevaux sont attelés.

Tableau 26 : Répartition des types de boiteries antérieures attelé en fonction des entraîneurs

	Entraîneur 1				Entraîneur 2			
	AG	AD	PG	PD	AG	AD	PG	PD
Boiterie d'impact	33%	23%	26%	0%	50%	35%	14%	35%
Boiterie de poussée	66%	77%	57%	80%	50%	65%	67%	15%
Boiterie impact + poussée	/	/	17%	20%	/	/	19%	50%

Chez les deux entraîneurs, les boiteries de poussée sont largement majoritaires pour les membres antérieurs. Pour les membres postérieurs, les boiteries de poussée sont également les plus présentes sauf pour le membre postérieur droit chez l'entraîneur 2 où les boiteries mixtes d'impact et de poussée sont plus fréquentes.

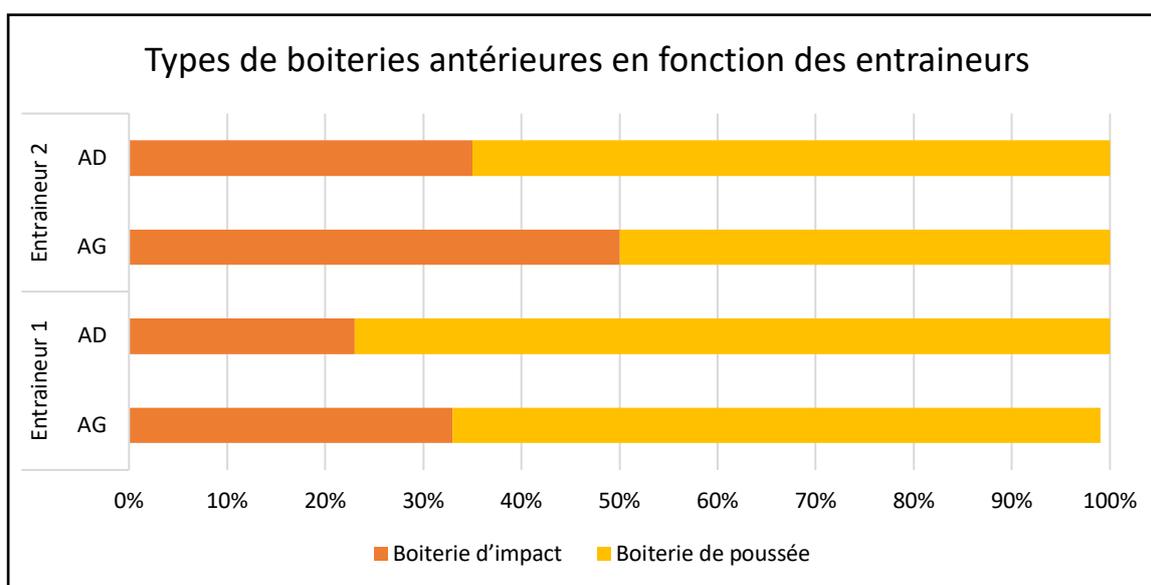


Figure 65 : Représentation graphique des types de boiteries antérieures en fonction des entraîneurs

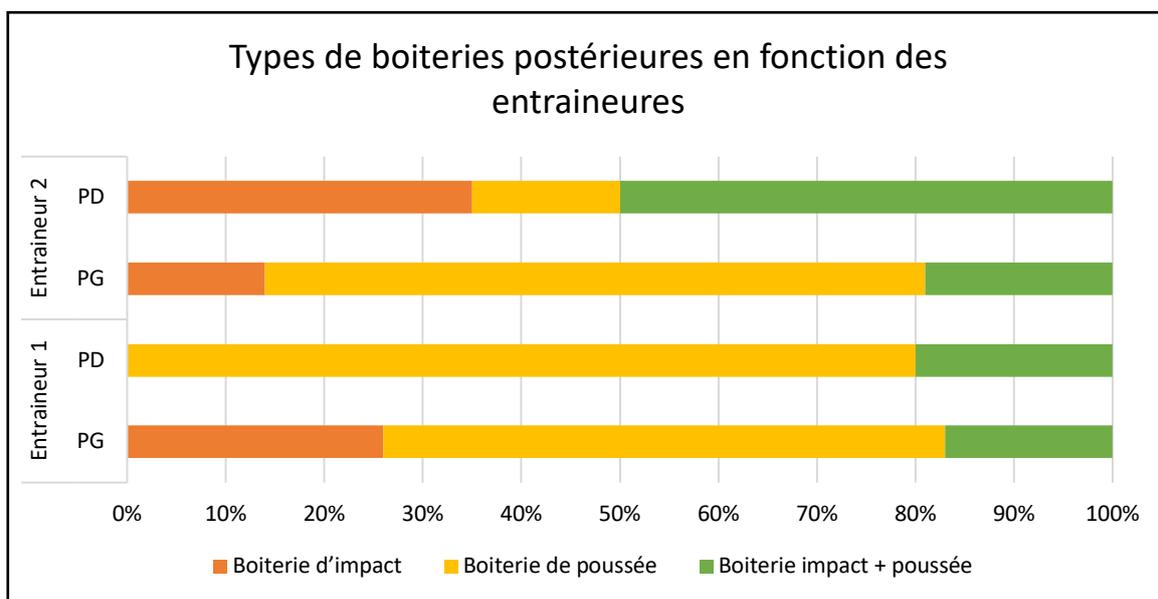


Figure 66 : Représentation graphique des types de boiteries postérieures en fonction des entraîneurs

Les différences de boiteries attelées pour chacun des membres sont comparées par un test statistique de χ^2 . Les p-values sont résumées dans le tableau suivant. On considère le résultat comme significatif lorsque la p-value est inférieure au seuil de 0,05.

Tableau 25 : Résultats des calculs de p-value par un test du χ^2 sur les types de boiteries antérieures en fonction des pistes d'entraînement.

Entraîneur 2		AG		AD		PG			PD		
		Impact	Poussée	Impact	Poussée	Impact	Poussée	Mixte	Impact	Poussée	Mixte
Entraîneur 1	AG	< 0,0001	< 0,0001								
	PG	0,0197	< 0,0001								
AD	Impact			-	-						
	Poussée			0,084	0,075						
PG	Impact					0,045	-	-			
	Poussée					-	-	-			
	Mixte					-	0,012	-			
PD	Impact								NR	NR	NR
	Poussée								-	-	0,012
	Mixte								0,021	0,016	0,023

Le test de χ^2 valide les observations précédentes : les boiteries de poussées sont plus fréquentes que les boiteries d'impact sur les antérieurs surtout chez l'entraîneur 1. De même, les boiteries de poussées sont les plus fréquentes pour les membres postérieurs, suivies des boiteries mixtes chez l'entraîneur 1. Chez l'entraîneur 2, ce sont les boiteries mixtes qui prédominent sur les boiteries de poussée postérieures.

5) Compensation à grande vitesse

Les phénomènes de compensation à haute vitesse décrits dans la littérature se retrouvent également dans nos enregistrements. Ces types de compensations consistent en une boiterie primaire du postérieur et une compensation sur l'antérieur controlatéral.

Le Lameness Locator relève ainsi 11 cas pour lequel une boiterie primaire du postérieur droit est compensée par une boiterie secondaire de l'antérieur gauche. Le vétérinaire détecte une boiterie de l'antérieur gauche dans 7 cas sur les 11 de départ et omet la boiterie du postérieur droit dans 3 cas.

Dans 31 cas, le Lameness Locator indique une boiterie primaire du postérieur gauche, compensée par une boiterie de l'antérieur droit. Le vétérinaire détecte une boiterie de l'antérieur droit dans 17 cas sur les 31 de départ et omet la boiterie du postérieur gauche dans 8 cas sur les 17.

Ces boiteries de compensation se retrouvent surtout chez l'entraîneur 1 : dans 73% des cas pour la première catégorie de compensation et 60% des cas dans la deuxième catégorie. Les chevaux présentant ce type de compensation sont souvent les mêmes chevaux qui réitèrent ce schéma aux différentes vitesses et dates d'évaluation. D'autre part, certains d'entre eux changent de diagonal de compensation au cours des exercices.

Ces types de compensation interviennent aussi bien lors des tests en main qu'à l'échauffement ou aux paliers de vitesses plus élevés.

Par comparaison, les compensations répondant à la première loi des côtés sont au nombre de 38 avec 20 cas où les chevaux compensent une boiterie postérieur droit par une boiterie secondaire de l'antérieur droit et 18 cas où une boiterie primaire du postérieur gauche est compensée par une boiterie de l'antérieur gauche. 1 seul cas seulement répond à la deuxième loi des côtés.

C. Confrontation des données des analyses subjectives et objectives

La réalisation de mesures simultanées avec le Lameness Locator et l'évaluation du vétérinaire nous permet de comparer les données obtenues afin d'évaluer la fiabilité de l'appareil de mesure et la sensibilité de détection des boiteries en main et à grande vitesse par le vétérinaire.

1) Confrontation des évaluations subjectives et des données objectives

a) Évaluation des types d'erreurs commises par l'opérateur

i) En fonction des paliers de vitesses

Les tableaux suivants distinguent les erreurs commises par le vétérinaire en fonction des paliers de vitesses sur les membres antérieurs puis les membres postérieurs. Le troisième tableau évalue la symétrie des erreurs à droite ou à gauche.

Pour ces calculs, les seuils choisis sont de 12mm pour les antérieurs et de 7mm pour les postérieurs.

Le taux d'erreur est calculé à partir du nombre d'erreurs commises sur le nombre d'évaluations à chaque palier de vitesse. Les pourcentages d'erreurs mineures et majeures sont ensuite calculés à partir du taux d'erreur.

Tableau 25 : Répartition des types d'erreurs antérieures en fonction des paliers de vitesses

	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
En main	13	16%	1%	0%	1%	15%	4%	11%	0%
Échauffement	15	26%	9%	2%	7%	17%	0%	17%	0%
Palier 1	8	15%	4%	0%	4%	11%	5%	6%	0%
Palier 2	11	22%	4%	0%	4%	18%	4%	12%	2%
Palier 3	8	17%	2%	0%	2%	15%	4%	11%	0%

Lors de l'évaluation des antérieurs, sur les 265 évaluations, le vétérinaire commet 16% d'erreurs soit 10% d'erreurs majeures B et 4% d'erreurs majeures A.

En considérant à présent les paliers séparément, le pourcentage d'erreurs mineures est plus faible en main qu'attelé mais l'augmentation de vitesse tend à faire baisser ce pourcentage. Les erreurs mineures sont essentiellement des erreurs de modérées.

Le pourcentage d'erreurs majeures est lié à un fort taux d'erreurs de type majeures B puis A dans une moindre mesure. Aucune tendance ne se dégage concernant l'évolution des erreurs majeures en fonction des paliers de vitesse.

Tableau 26 : Répartition des types d'erreurs postérieures en fonction des paliers de vitesses

	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
En main	9	13%	3%	3%	0%	10%	3%	7%	0%
Échauffement	13	26%	0%	0%	0%	26%	9%	17%	0%
Palier 1	10	20%	4%	4%	0%	16%	3%	13%	0%
Palier 2	10	20%	5%	5%	0%	15%	2%	12%	1%
Palier 3	7	16%	4%	4%	0%	12%	4%	8%	0%

Lors de l'évaluation des postérieurs, le vétérinaire commet 15% d'erreurs soit 8% d'erreurs majeures B et 4% d'erreurs majeures A en prenant en compte la totalité des mesures pour les membres antérieurs.

En considérant à présent les paliers séparément, le pourcentage d'erreurs sur des boiteries de membres postérieurs diminue avec l'augmentation de la vitesse lorsque les chevaux sont attelés. Les erreurs mineures commises sont uniquement des erreurs de compensation contrairement aux membres antérieurs.

Le pourcentage d'erreurs majeures diminue avec la vitesse. Ce sont essentiellement des erreurs majeures B qui sont plus importantes attelés qu'en main. Le pourcentage d'erreurs majeures B diminue avec la vitesse. Les erreurs majeures A sont également fréquentes.

Tableau 27 : Répartition des types d'erreurs antérieures et postérieures et de la symétrie des erreurs en fonction des paliers de vitesses

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
En main	26	37%	4%	21%	12%	16%	21%
Échauffement	23	47%	6%	14%	27%	16%	31%
Palier 1	23	45%	8%	18%	19%	17%	28%
Palier 2	24	48%	2%	26%	20%	19%	29%
Palier 3	19	42%	9%	17%	16%	21%	21%

En main, le vétérinaire commet plus d'erreurs sur les membres antérieurs que sur les membres postérieurs. Les erreurs simples sur un antérieur ou un postérieur sont nettement plus représentées que les erreurs mixtes antérieurs + postérieurs quel que soit le palier.

Le nombre d'erreurs sur des membres droits augmente avec l'augmentation de la vitesse lorsque les chevaux sont attelés. Au contraire, les erreurs sur les membres gauches diminuent avec l'augmentation de la vitesse. Toutefois le vétérinaire commet en moyenne

moins d'erreurs sur les membres droits. Au palier 3, le vétérinaire commet autant d'erreurs à droite qu'à gauche.

Le tableau suivant regroupe les calculs de p-value issus des tests du Kruskal-Wallis permettant de comparer la symétrie des erreurs en fonction du palier de vitesse. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

Tableau 28 : Résultats des calculs de p-value par un test du χ^2 sur les types de boiteries antérieures en fonction des paliers

		Main		Échauffement		Palier 1		Palier 2		Palier 3	
		Err Droite	Err Gauche	Err Droite	Err Gauche	Err Droite	Err Gauche	Err Droite	Err Gauche	Err Droite	Err Gauche
Main	Err Droite		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Err Gauche	-		-	0,039	-	0,049	-	-	-	-
Échauffement	Err Droite	-	-		0,021	0,029	-	-	-	-	0,023
	Err Gauche	0,070	0,070	0,021		0,021	-	0,021	-	-	-
Palier 1	Err Droite	-	-	-	0,011		0,027	-	0,049	-	-
	Err Gauche	-	0,049	-	-	0,027		0,027	-	0,033	-
Palier 2	Err Droite	-	-	-	0,021	-	0,027		0,049	-	-
	Err Gauche	-	-	-	-	0,049	-	0,049		-	-
Palier 3	Err Droite	-	-	-	-	-	0,033	0,049	-		-
	Err Gauche	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Le calcul des p-value permet de confirmer le nombre d'erreurs commises sur les membres gauches est plus important que sur les membres droits à l'échauffement et aux paliers 1 et 2. De plus, le nombre d'erreur à droite augmente significativement entre les paliers 1, 2 et 3.

ii) En fonction des entraîneurs

Les tableaux suivants représentent les erreurs commises par le vétérinaire en distinguant les chevaux évalués chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2.

Tableau 29 : Répartition des types d'erreurs antérieures en fonction des entraîneurs

	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
Entraîneur 1	23	18%	6%	2%	4%	12%	1%	11%	0%
Entraîneur 2	28	20%	4%	1%	3%	16%	6%	10%	0%

Le vétérinaire commet autant d'erreurs sur les membres antérieurs chez les deux entraîneurs. En revanche, le vétérinaire commet plus d'erreurs mineures chez l'entraîneur 1 et plus d'erreurs majeures chez l'entraîneur 2. Les erreurs modérées sont les plus représentées chez les deux entraîneurs pour les erreurs mineures. Pour les erreurs majeures, il y a autant d'erreurs majeures B chez les deux entraîneurs.

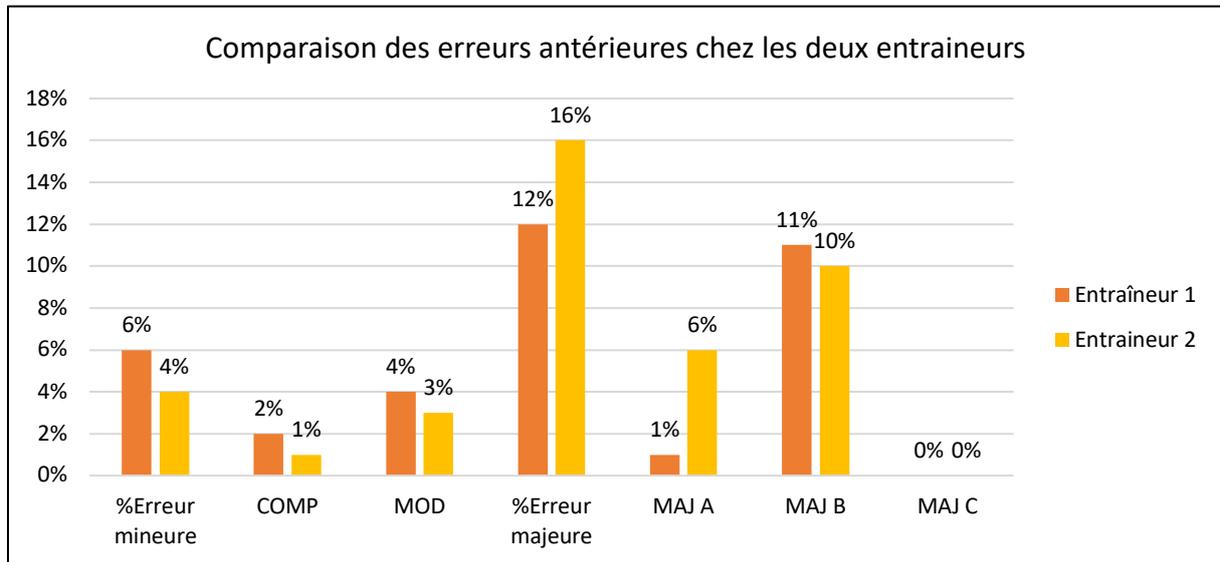


Figure 67 : Représentation graphique des erreurs commises par le vétérinaire sur les membres antérieurs en fonction des entraîneurs

Le tableau suivant représente les calculs de p-value issues du test de Kruskal-Wallis permettant de comparer les différents types d'erreurs respectivement chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2 puis de comparer les types d'erreurs entre les deux entraîneurs. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

Tableau 30 : Résultats des calculs de p-value par un test de Kruskal-Wallis comparant les erreurs majeures chez les deux entraîneurs

	Entraîneur 1				Entraîneur 2			
	MAJ A	MAJ B	MAJ C	COMP	MAJ A	MAJ B	MAJ C	COMP
MAJ A		< 0,0001	0,050			0,049	0,024	
MAJ B	< 0,001		< 0,0001		0,049		< 0,0001	
MAJ C	0,050	< 0,0001			0,024	< 0,0001		
MOD				-				-

Le calcul des p-value montre l'absence de différence statistique entre les erreurs commises chez l'entraîneur 1 et chez l'entraîneur 2. En revanche, ces calculs confirment la prédominance des erreurs majeures B par rapport aux erreurs majeures A et C chez les deux entraîneurs.

Tableau 31 : Répartition des types d'erreurs postérieures en fonction des entraîneurs

	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
Entraîneur 1	22	17%	2%	2%	0%	15%	4%	10%	1%
Entraîneur 2	27	20%	5%	5%	0%	15%	3%	12%	0%

Le vétérinaire commet plus d'erreurs sur les membres postérieurs chez l'entraîneur 2. Les erreurs mineures sont uniquement des erreurs de compensation chez les deux entraîneurs mais le pourcentage d'erreurs mineures est deux fois plus élevé chez l'entraîneur 2. Pour les erreurs majeures, le vétérinaire commet 3 fois plus d'erreurs majeures B que d'erreurs majeures A chez les deux entraîneurs.

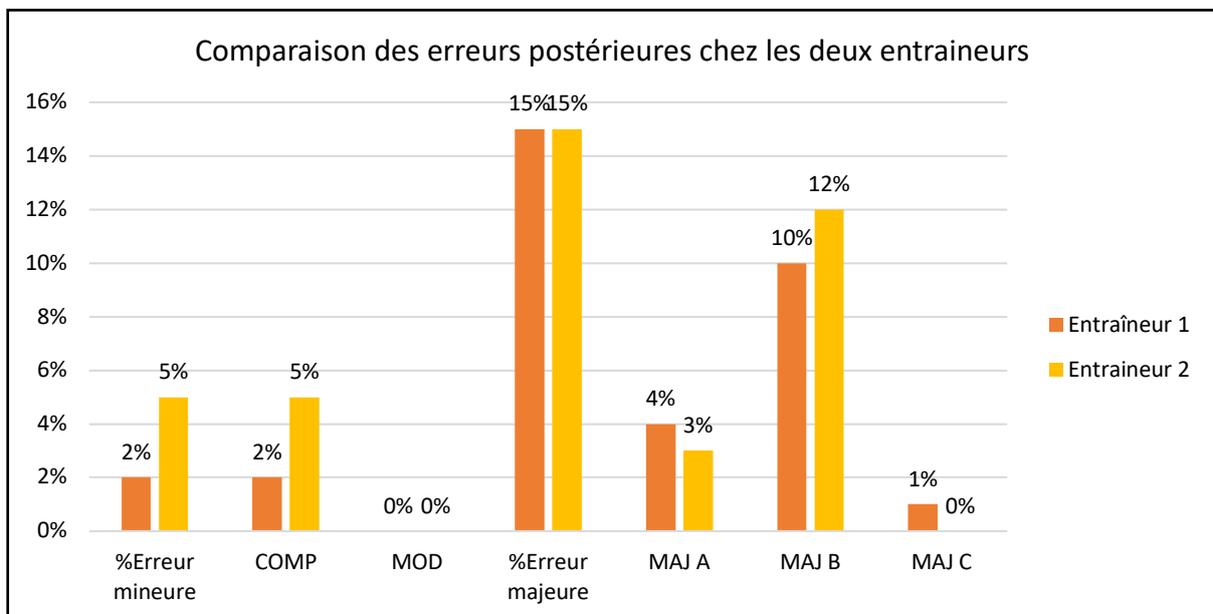


Figure 68 : Représentation graphique des erreurs commises par le vétérinaire sur les membres postérieurs en fonction des entraîneurs

Les tableaux suivants représentent les calculs de p-value issues du test de Kruskal-Wallis permettant de comparer les différents types d'erreurs respectivement chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2 puis de comparer les types d'erreurs entre les deux entraîneurs. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

Tableau 32 : Résultats des calculs de p-value par un test de Kruskal-Wallis comparant les erreurs majeures chez les deux entraîneurs

	Entraîneur 1				Entraîneur 2			
	MAJ A	MAJ B	MAJ C	COMP	MAJ A	MAJ B	MAJ C	COMP
MAJ A		0,001	-			< 0,0001	-	
MAJ B	0,001		< 0,0001		< 0,0001		< 0,0001	
MAJ C	-	< 0,0001			-	< 0,0001		
MOD				-				0,011

Comme pour les antérieurs, il n'est pas possible de dire que le vétérinaire commet plus d'erreurs majeures chez l'un ou l'autre des entraîneurs. En revanche, ces calculs confirment la prédominance des erreurs majeures B par rapport aux erreurs majeures A et C chez les deux entraîneurs.

Tableau 33 : Répartition des types d'erreurs antérieures et postérieures et de la symétrie des erreurs en fonction des entraîneurs

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
Entraîneur 1	53	41%	6%	18%	17%	16%	25%
Entraîneur 2	62	46%	5%	21%	20%	21%	25%

Chez les deux entraîneurs, le vétérinaire commet autant d'erreurs antérieures que postérieures. Les erreurs mixtes sont peu fréquentes. Le vétérinaire commet autant d'erreurs à gauche chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2. Les erreurs à droite sont plus représentées chez l'entraîneur 2 que chez l'entraîneur 1. Les erreurs restent toutefois plus importantes sur les membres gauches chez les deux entraîneurs.

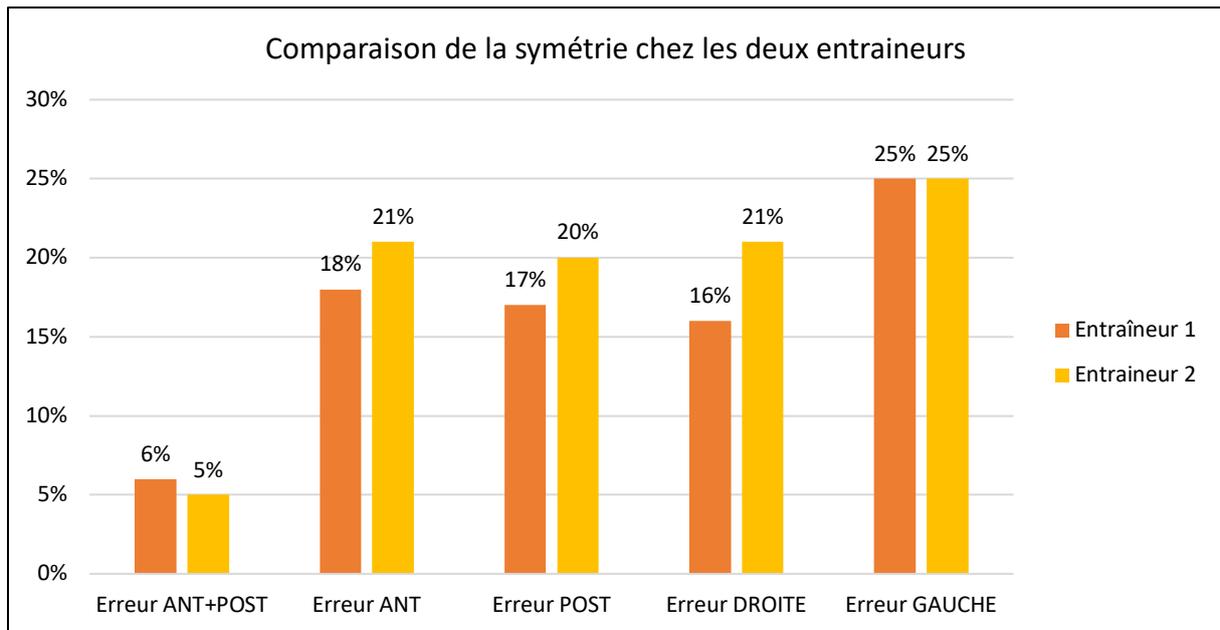


Figure 69 : Représentation graphique des erreurs commises par le vétérinaire sur les membres postérieurs en fonction des entraîneurs

Le tableau suivant représente les calculs de p-value issues du test de Kruskal-Wallis permettant de comparer les différents types d'erreurs respectivement chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2 puis de comparer les types d'erreurs entre les deux entraîneurs. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

Tableau 34 : Résultats des calculs de p-value par un test de Kruskal-Wallis comparant les erreurs majeures chez les deux entraîneurs

	Entraîneur 1				Entraîneur 2			
	Err ANT	Err POST	Err ANT + POST	Err DROITE	Err ANT	Err POST	Err ANT + POST	Err DROITE
Err ANT		-	0,002			-	0,002	
Err POST	-		0,028		-		0,003	
Err ANT + POST	0,002	0,028			0,002	0,003		
Err GAUCHE				0,005				-

Le calcul des p-value confirme la prédominance des erreurs antérieures et postérieures sur les erreurs mixtes chez les deux entraîneurs. De plus, le nombre d'erreurs à gauche est significativement plus important que le nombre d'erreurs à droite chez l'entraîneur 1. En revanche, on ne peut pas conclure sur les différences entre les erreurs à droite et à gauche entre les entraîneurs 1 et 2.

iii) En fonction des seuils de la machine

Les tableaux suivants permettent d'évaluer l'évolution des types d'erreurs du vétérinaire en fonction des seuils de la machine. Les pourcentages sont calculés à partir des 265 évaluations.

Tableau 35 : Répartition des types d'erreurs antérieures en fonction des seuils du Lameness Locator

Seuil	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
6 mm	75	28%	7%	1%	6%	21%	5%	15%	1%
12 mm	49	18%	4%	0%	4%	14%	4%	10%	0%
18 mm	30	11%	2%	0%	2%	9%	2%	6%	0%

Le nombre d'erreurs diminue progressivement avec l'augmentation du seuil de la machine. Le nombre d'erreurs modérées diminue lorsque le seuil augmente. Le pourcentage d'erreurs majeures décroît avec l'augmentation des seuils. La répartition entre les différents types d'erreurs reste relativement stable avec l'augmentation des seuils de détection : on retrouve environ 3 fois plus d'erreurs majeures B que d'erreurs majeures A. et la répartition des erreurs majeures restent relativement stables avec l'augmentation des seuils.

Le calcul de la p-value par l'utilisation du test statistique de Kruskal-Wallis comparant les erreurs commises en fonction du seuil de la machine choisi n'a permis de révéler aucune différence significative entre le nombre d'erreurs à chacun des paliers.

Tableau 36 : Répartition des types d'erreurs postérieures en fonction des seuils du Lameness Locator

Seuil	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
3 mm	94	35%	11%	9%	2%	24%	6%	17%	1%
5 mm	69	26%	6%	5%	1%	20%	5%	14%	0%
7 mm	55	21%	4%	4%	0%	17%	3%	13%	1%
9 mm	37	14%	1%	1%	0%	13%	3%	9%	1%

Le nombre d'erreurs commises sur les membres postérieurs diminue régulièrement avec l'augmentation du seuil de la machine.

Le pourcentage d'erreurs mineures diminue avec l'augmentation du seuil : les erreurs modérées s'annulent à partir d'un seuil de 7mm et les erreurs compensées diminuent

nettement entre les seuils de 3 et 5mm. Ces erreurs mineures correspondent donc à de faibles variations de P diff Max et P diff Min.

Le pourcentage d'erreurs majeures diminue également avec l'augmentation des seuils par augmentation des erreurs majeures A et B qui diminuent de moitié entre le seuil de 3mm et celui de 9mm.

De la même façon que pour les antérieurs, l'utilisation du test statistique de Kruskal-Wallis permet l'obtention d'une p-value sont réalisés à partir de la comparaison des erreurs commises en fonction du seuil de la machine choisi. Le nombre d'erreurs compensées diminue significativement entre chaque seuil choisi. Toutefois, il n'est pas possible de conclure quant à la diminution des erreurs majeures entre les différents seuils.

Tableau 37 : Répartition des types d'erreurs antérieures et postérieures et de la symétrie des erreurs en fonction des seuils du Lameness Locator

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
6/3	195	73%	21%	28%	23%	35%	38%
12/7	115	43%	6%	19%	18%	20%	23%
18/9	76	29%	2%	13%	14%	13%	16%

Le nombre d'erreur diminue fortement entre les paliers 6/3 et 12/7. Le seuil de 12/7 choisi précédemment permet de supprimer certains enregistrements parasites ne correspondant pas à une réelle boiterie chez les trotteurs en piste.

Pour les erreurs mixtes, le calcul de p-value indique un résultat significatif entre les seuils de 6/3 et 12/7 (p-value = 0,008), entre les seuils de 6/3 et 18/9 (p-value=0,01) et entre les seuils de 12/7 et 18/9 (p-value = 0,05)

Le calcul des p-value confirme la diminution du pourcentage d'erreurs à droite et à gauche entre les différents paliers : La diminution des erreurs à droite est notable entre les seuils 6/3 et 12/7 ($p < 0,001$) et entre 12/7 et 18/9 ($p = 0,007$). Pour les erreurs à gauche, il existe uniquement une différence significative entre les seuils 6/3 et 18/9 ($p = 0,001$).

b) Progression de l'observateur au cours des essais

Les tableaux suivants regroupent les erreurs commises par le vétérinaire en fonction des jours d'évaluation afin d'analyser la progression de l'observateur. Les résultats font l'objet d'une vérification statistique par le biais du test de Kruskal-Wallis. Le test est jugé comme significatif lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

Tableau 38 : Répartition des types d'erreurs antérieures en fonction des dates d'évaluations

	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
J0	29	31%	9%	0%	9%	22%	1%	21%	0%
J30	14	15%	3%	2%	1%	12%	4%	8%	0%
J60	7	11%	1%	0%	1%	10%	6%	3%	1%

Le vétérinaire commet de moins en moins d'erreurs sur les antérieurs au cours des différents essais. Le pourcentage d'erreurs modérées diminue très fortement entre J0 et J30. Le calcul de p-value par le test de Kruskal-Wallis indique une nette diminution entre le nombre d'erreurs majeures B détectées à J0 et J30 (p-value = 0,001), J0 et J60 (p-value < 0,0001). Ces résultats confirment la progression de l'observateur dans la détection de ce type de boiterie au cours des essais. Au contraire, le vétérinaire commet un nombre croissant d'erreurs majeures A entre les essais (p-value = 0,02).

Au cours des essais, le vétérinaire s'améliore donc dans la détection des boiteries antérieures : Il commet moins d'erreurs modérées et visualise mieux l'ensemble des boiteries.

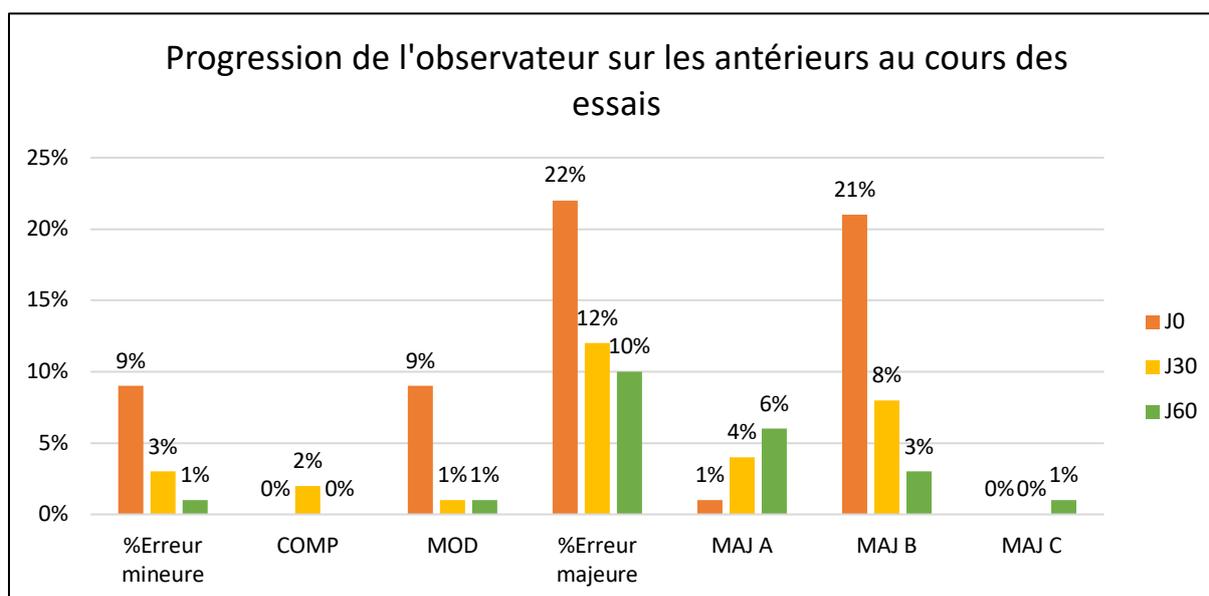


Figure 70 : Représentation graphique des erreurs commises par le vétérinaire sur les membres antérieurs en fonction des dates d'évaluation

Tableau 39 : Répartition des types d'erreurs postérieures en fonction des dates d'évaluations

	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
J0	15	16%	5%	5%	0%	11%	4%	7%	0%
J30	16	17%	2%	2%	0%	15%	2%	13%	0%
J60	14	23%	3%	3%	0%	20%	5%	15%	0%

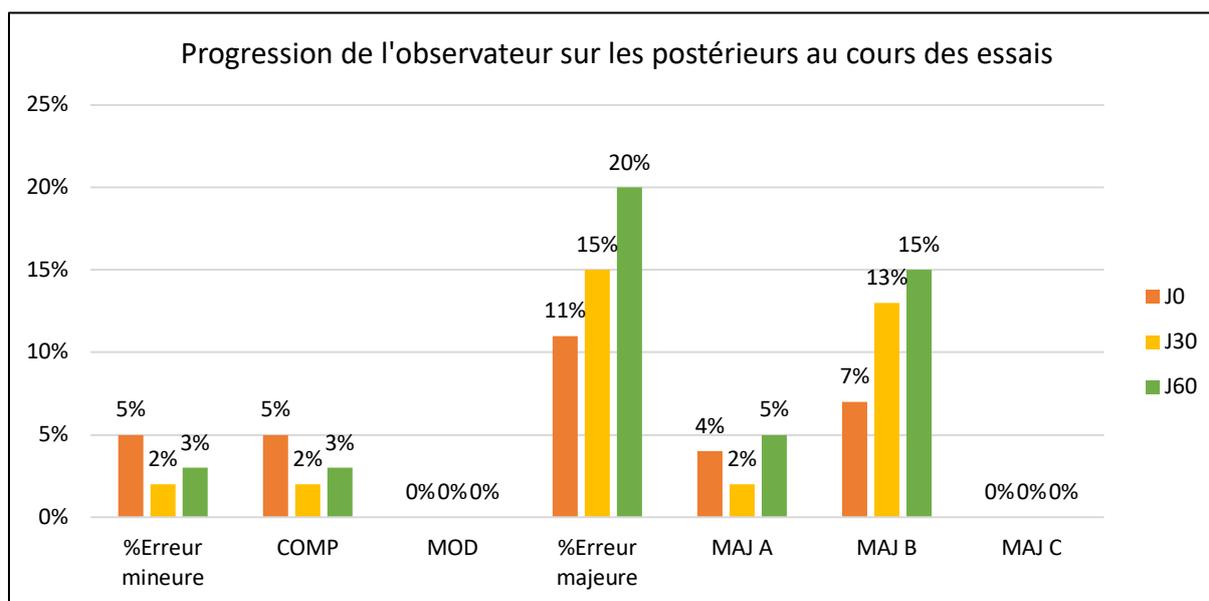


Figure 71 : Représentation graphique des erreurs commises par le vétérinaire sur les membres postérieurs en fonction des dates d'évaluation

Le nombre d'erreurs sur les membres postérieurs augmente entre chaque jour d'évaluation. Le pourcentage d'erreurs mineures diminue entre J0 et J30 par une diminution des erreurs de compensation. Le pourcentage d'erreurs majeures augmente entre J0 et J60 et est représenté en majorité par des erreurs majeures B. Les différences d'erreurs majeures au cours des différents essais ne sont pas significatives. Il n'est donc pas possible de conclure en une progression de l'observateur au cours des essais pour les membres postérieurs. En revanche, le vétérinaire s'améliore dans la détection des erreurs de compensation postérieures au cours des essais ($p = 0,023$).

Tableau 40 : Répartition des types d'erreurs antérieures et postérieures et de la symétrie des erreurs en fonction des dates d'évaluations

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreur	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
J0	51	56%	8%	32%	16%	24%	32%
J30	35	37%	5%	15%	17%	14%	23%
J60	24	39%	5%	12%	23%	27%	28%

Le pourcentage d'erreurs globales diminue fortement entre J0 et J30 et augmente légèrement entre J30 et J60. Le nombre d'erreurs sur les antérieurs diminue significativement entre J0 et J30 (p -value = 0,007) et entre J0 et J60 (p -value = 0,004). Les erreurs mixtes (antérieurs et postérieurs) restent stables au cours des essais. Le calcul des p -value indique qu'il n'est pas possible de conclure quant à une augmentation des erreurs sur les postérieurs. Les erreurs à droite et à gauche diminuent significativement entre J0 et J30 : la p -value est de 0,032 entre J0 et J30, de 0,05 entre J0 et J60 et de 0,009 entre J30 et J60.

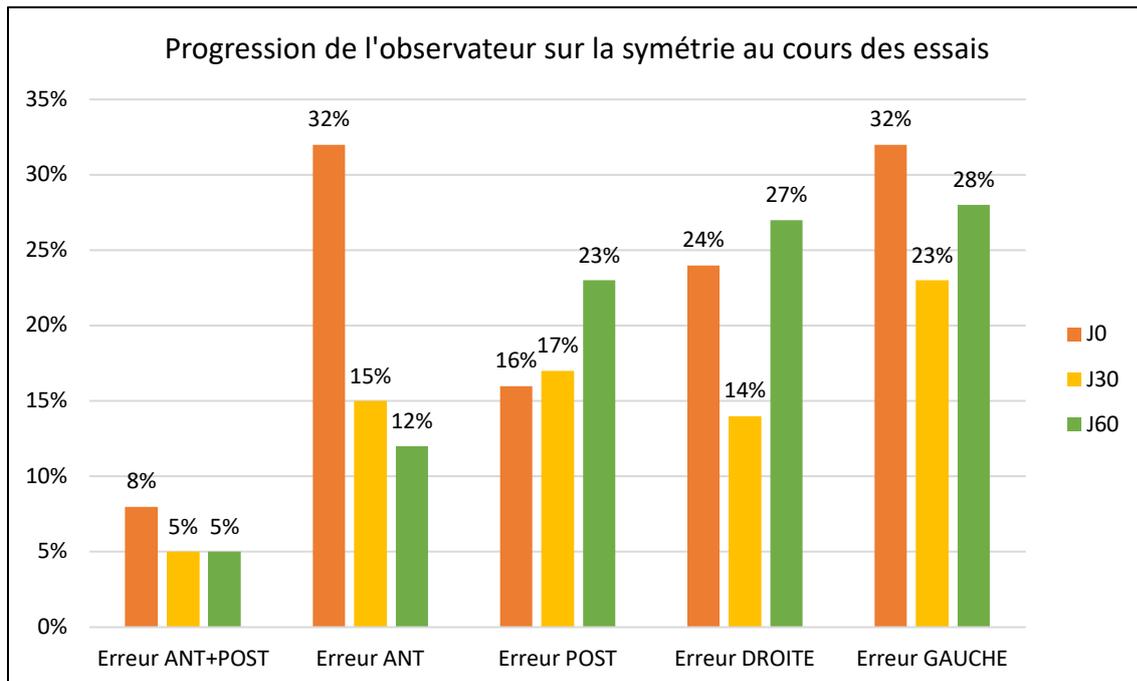


Figure 72 : Représentation graphique des erreurs de symétrie commises par le vétérinaire en fonction des dates d'évaluation

c) Corrélation entre le grade de boiterie annoncé par le vétérinaire et les valeurs de la machine

Le vétérinaire évalue chacune des boiteries selon la gradation internationale AAEP. Le Lameness Locator ne fournit pas une gradation de la boiterie mais des mesures continues de ses variables H diff Max, H diff Min, P diff Max et P diff Min.

L'objet de cette partie est de déterminer l'existence ou non d'une corrélation entre la gradation de la boiterie donnée par le vétérinaire et les valeurs indiquées par le Lameness Locator.

Le tableau suivant regroupe le nombre des valeurs, la moyenne et l'écart-type des H diff Min en fonction des gradations indiquées par le vétérinaire. Ainsi, pour chaque évaluation du vétérinaire, le grade indiqué par ce dernier est relevé et son H diff Min est enregistré dans chaque catégorie de grade. Les grades négatifs correspondent à des boiteries de l'antérieur gauche, alors que les grades positifs correspondent aux boiteries de l'antérieur droit.

Tableau 41 : Résultats de la corrélation entre le grade de boiterie antérieur indiqué par le vétérinaire et les valeurs de H diff Min

Gradation AAEP	Nombre de H DIFF MIN	Moyenne de H DIFF MIN	Écart-type de H DIFF MIN
-2	25	-21,96	17,70
-1	42	-5,40	12,11
0	78	0,73	6,04
1	22	9,51	11,50
2	30	18,22	15,95
3	1	24,30	
Total général	198	0,31	16,30

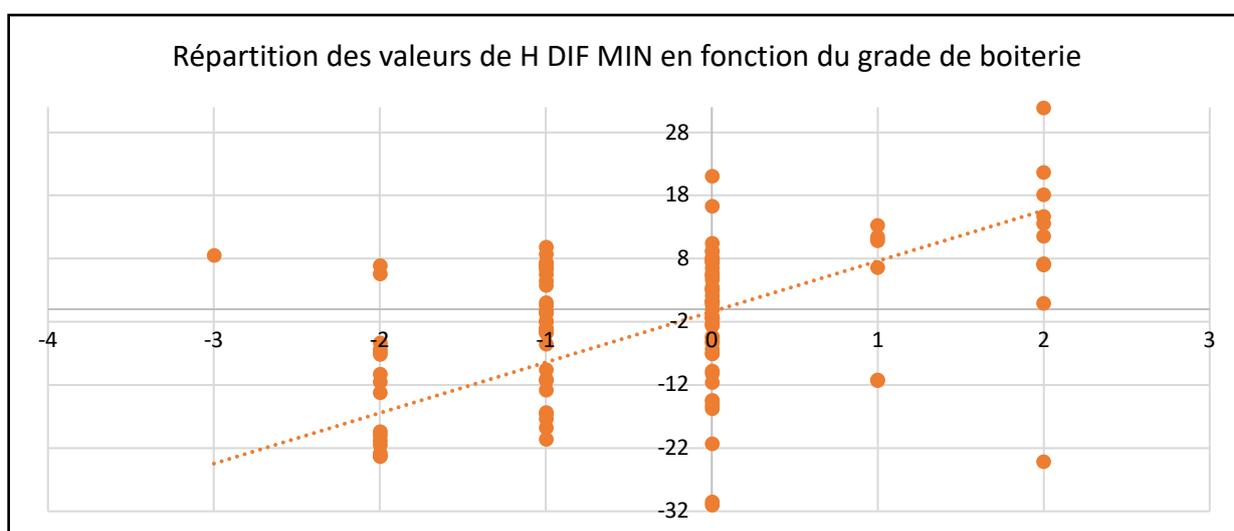


Figure 73 : Représentation graphique de la répartition des valeurs de H diff Min en fonction du grade de boiterie annoncé par le vétérinaire et relation linéaire

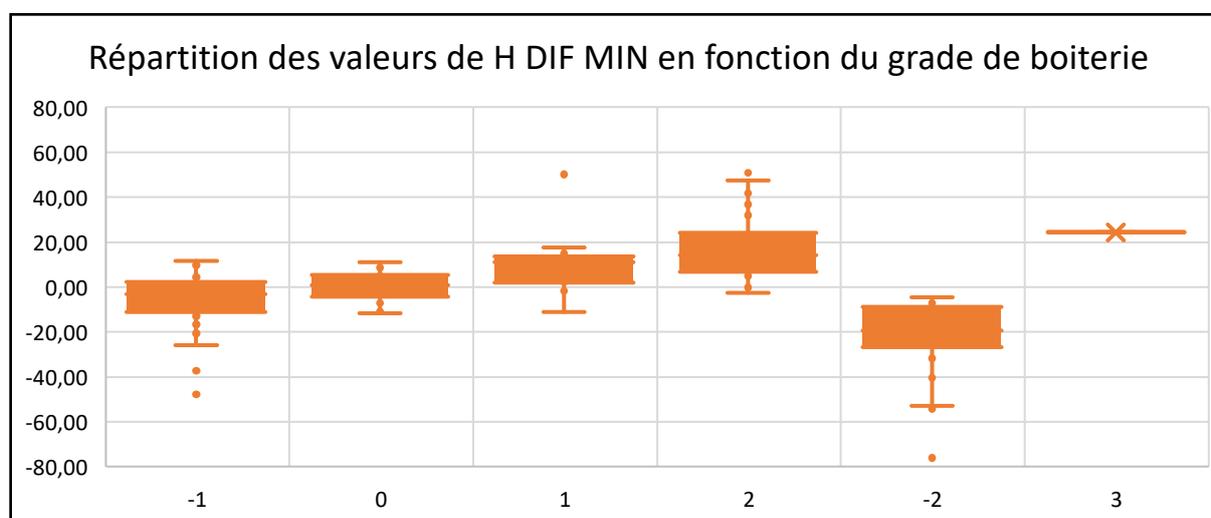


Figure 74 : Représentation graphique sous forme de la répartition des valeurs de H diff Min en fonction du grade de boiterie annoncé par le vétérinaire

Lorsque le vétérinaire indique une gradation de boiterie de 0, la moyenne des H diff Min est également proche de 0. Il existe par ailleurs une relation linéaire entre le grade de la boiterie et la valeur de H diff Min. Ainsi, on retrouve une corrélation entre le grade de boiterie et la valeur de H diff Min indiquée par la machine. Cette relation s'avère relativement intéressante puisqu'à partir d'une valeur de H diff Min, il serait possible de connaître l'intensité de la boiterie.

L'utilisation de la fonction ANOVA et du modèle linéaire permettent d'obtenir une p value de 0,00096 pour l'antérieur droit et de 0,0023 pour l'antérieur gauche. Ces dernières permettent de confirmer l'existence d'une corrélation entre le grade de boiterie antérieure donnée par le vétérinaire et la valeur H diff Min indiquée par le Lameness Locator.

Le tableau suivant regroupe le nombre des valeurs, la moyenne et l'écart-type de la somme des valeurs absolues de P diff Max et P diff Min en fonction des gradations indiquées par le vétérinaire.

Tableau 42 : Résultats de la corrélation entre le grade de boiterie postérieure indiqué par le vétérinaire et les valeurs absolues de la somme des P diff Min et P diff Max

Gradation AEEP	S PDIFF abs	Moyenne de S P DIFF abs	Écartype de S P DIFF abs
0	60	5,71	3,07
1	115	10,71	7,05
2	25	16,16	8,88
3	1	29,50	
Total général	201	9,99	7,28

Comme pour les membres antérieurs, la moyenne de la somme des valeurs absolues de P diff Max et P diff Min augmente avec le grade de boiterie. Les écarts-types sont également élevés et le test statistique de corrélation indique une p value de 0,0014. Ces résultats ne permettent pas de conclure à une corrélation significative.

D. Impact du côté d'évaluation des chevaux à la piste

Les analyses précédentes ont permis de montrer que les chevaux présentent globalement plus une boiterie de leur membre postérieur gauche et que le vétérinaire commet plus d'erreur sur les membres gauches.

L'étude suivante consiste à évaluer la symétrie des chevaux à la piste et l'impact du tournant à droite ou à gauche sur la survenue de boiterie. Le côté d'évaluation du vétérinaire à la piste est également étudié afin d'analyser une possible corrélation entre le côté où les chevaux sont observés en piste et le type d'erreurs commises par le vétérinaire.

1) Évaluation de la symétrie des chevaux en fonction du tournant droit ou gauche

Dans un premier temps, nous évaluons la symétrie des chevaux à la piste en fonction des sorties de tournants à droite ou à gauche à partir des données du Lameness Locator.

Le tableau suivant regroupe les pourcentages de boiteries sur chacun des membres dans les deux écuries sans distinction de la sortie du tournant.

Tableau 43 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des évaluations

	AG	AD	PG	PD
Effectif	67	68	92	47
Pourcentage	24%	25%	34%	17%

Les chevaux sont autant boiteux de leur antérieur droit que de l'antérieur gauche. Par contre, la boiterie du postérieur gauche est deux fois plus fréquente que la boiterie du postérieur droit.

La fonction ANOVA comparant les valeurs de H diff Min entre les chevaux évalués à main droite ou à main gauche indique une p-value de 0,0023. Il existe une différence significative entre les boiteries de l'antérieur droit ou de l'antérieur gauche en fonction du tournant.

Pour les boiteries de membres postérieurs, la comparaison des valeurs de la somme des P diff entre les chevaux tournant à main droite ou à main gauche indique une p-value de 0,00289. Les boiteries du postérieur gauche sont plus fréquentes que les boiteries du postérieur droit.

Dans le tableau suivant, ne sont représentés que les chevaux évoluant à main gauche avec une sortie de tournant à gauche soit uniquement la moitié des chevaux de l'entraîneur 2.

Tableau 44 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux évalués à main gauche chez l'entraîneur 2

	AG	AD	PG	PD
Effectif	14	21	29	25
Pourcentage	16%	24%	32%	28%

Lorsque les chevaux sortent du tournant à gauche, ils présentent moins de boiterie de leur antérieur gauche que de l'antérieur droit. Le calcul de la p-value par un test de Kruskal-Wallis indique une valeur de 0,0017. Il existe une différence significative entre les boiteries des deux antérieurs dans ces conditions d'examen.

On note une augmentation du pourcentage des boiteries du postérieur droit et une légère diminution des boiteries du postérieur gauche par rapport au reste des chevaux évalués précédemment cependant, le test statique de Kruskal-Wallis indique une p-value de 0,633. Il n'est donc pas possible de comparer les pourcentages entre le postérieur droit et gauche dans ce cas.

Dans le tableau suivant, les chevaux évoluent cette fois-ci en sortie de tournant à droite. Cet effectif correspond à l'ensemble des chevaux évalués chez l'entraîneur 1 et la moitié des chevaux évalués chez l'entraîneur 2.

Tableau 45 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux évalués en sortie de tournant à droite chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2

	AG	AD	PG	PD
Effectif	53	47	63	22
Pourcentage	29%	25%	34%	12%

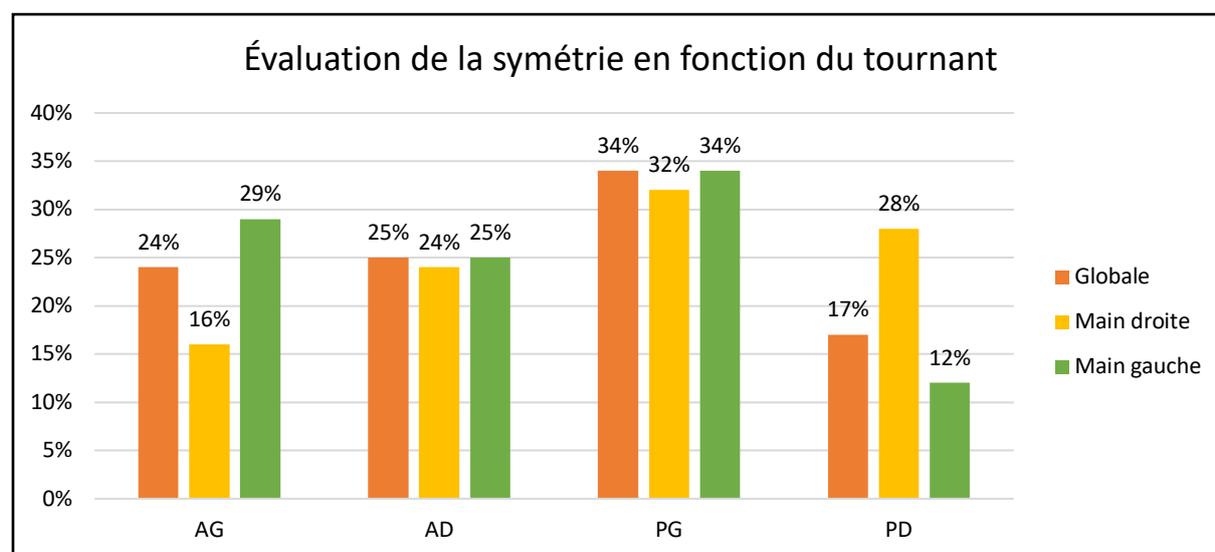


Figure 75 : Représentation graphique des boiteries antérieures en fonction de la main à laquelle les chevaux évoluent

Des tests statistiques de Kruskal-Wallis ont été réalisés en comparant les boiteries de chacun des membres en prenant en compte la sortie du tournant. Les chevaux présentent plus de boiteries de l'antérieur gauche en sortie de tournant à gauche qu'en sortie de tournant à droite (p-value = 0,043).

De la même façon, les chevaux présentent plus de boiteries du postérieur droit en sortie de tournant à gauche (p-value = 0,004).

En sortie de tournant à droite les chevaux sont plus fréquemment boiteux du postérieur gauche que du postérieur droit (p-value < 0,001).

Bilan : Les chevaux présentent une boiterie accentuée de l'antérieur droit en sortie de tournant à gauche. En sortie de tournant à droite, les boiteries de l'antérieur gauche et du postérieur gauche sont plus fréquentes qu'en sortie de tournant à gauche. Quel que soit le tournant, les chevaux sont plus fréquemment boiteux de leur postérieur gauche.

2) Impact de la vitesse et du tournant sur la locomotion

L'étude suivante permet de mesurer l'effet de la vitesse sur la locomotion en fonction de la main à laquelle les chevaux évoluent à partir des données objectives du Lameness Locator.

Le premier tableau résume l'effet de la vitesse sur la locomotion en prenant en compte l'ensemble des chevaux évalués indépendamment de la piste et du côté de sortie du tournant.

Tableau 46 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux aux différents paliers de vitesse

Paliers	Données	AG	AD	PG	PD
Test en main	70	31%	21%	30%	17%
Échauffement	57	23%	25%	35%	18%
Palier 1	53	21%	26%	40%	13%
Palier 2	51	25%	25%	35%	14%
Palier 3	43	19%	28%	28%	26%

Le pourcentage de boiteries de l'antérieur gauche en main est nettement plus élevé que celui présenté avec des chevaux attelés. On note de plus, une diminution de ce pourcentage avec l'augmentation de la vitesse. Les chevaux sont donc moins boiteux de ce membre à grande vitesse. Pour l'antérieur droit au contraire, le pourcentage de boiteries est plus faible en main qu'attelé et augmente avec l'augmentation de la vitesse.

Pour les membres postérieurs, le pourcentage de membres postérieurs gauches boiteux est nettement supérieur au postérieur droit quel que soit le palier de vitesse. De plus, le pourcentage de postérieurs gauches boiteux diminue entre les paliers 1 à 3 alors qu'il augmente pour celui des postérieurs droits entre ces mêmes paliers.

Le tableau suivant représente les pourcentages de boiteries chez l'entraîneur 1 où les chevaux n'évoluent qu'à main droite.

Tableau 47 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux évoluant à main droite chez l'entraîneur 1 aux différents paliers de vitesse

Paliers	Données	AG	AD	PG	PD
Test en main	35	37%	26%	31%	6%
Échauffement	29	28%	17%	38%	10%
Palier 1	24	25%	29%	17%	13%
Palier 2	26	35%	19%	35%	12%
Palier 3	20	20%	25%	35%	20%

L'application du test de Kruskal-Wallis n'a pas permis de mettre en évidence de différence significative entre les boiteries des membres antérieurs aux différents paliers de vitesse.

Pour les membres postérieurs, les boiteries du postérieur gauche en main sont significativement plus fréquentes que les boiteries du postérieur gauche, quel que soit le palier considéré. Il en va de même pour les boiteries du postérieur gauche à l'échauffement, significativement plus fréquentes que les boiteries du postérieur droit quel que soit le palier de vitesse considéré. De plus, le calcul des p-value permet de confirmer la prédominance des boiteries du postérieur gauche sur le postérieur droit au palier 1 (p-value = 0,044), au palier 2 (p-value = 0,044) et au palier 3 (p-value = 0,001).

En revanche, les différences de pourcentages entre chaque palier de vitesse pour un membre postérieur défini ne peuvent pas être comparées car les p-values sont supérieures à 0,05.

Quel que soit le palier de vitesse considéré, le pourcentage de boiteries de l'antérieur gauche est plus élevé que la moyenne établie dans le tableau précédent. Les chevaux présentent donc plus fréquemment une boiterie antérieure gauche.

En suivant le même raisonnement, le pourcentage de boiteries du postérieur droit est nettement diminué par rapport à la moyenne établie précédemment sur l'ensemble des chevaux. A main droite, les chevaux sont moins fréquemment boiteux de leur postérieur droit mais l'absence de différence significative entre les paliers de vitesse ne permet pas de conclure à une influence réelle de la vitesse.

Les tableaux suivants représentent les pourcentages de boiteries chez l'entraîneur 2 en distinguant, dans le premier tableau, les chevaux évoluant à main droite et dans le deuxième, ceux évoluant à main gauche.

Tableau 48 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux évoluant à main droite chez l'entraîneur 2 aux différents paliers de vitesse

Paliers	Données	AG	AD	PG	PD
Test en main	13	38%	23%	38%	0%
Échauffement	10	50%	20%	30%	0%
Palier 1	13	15%	31%	31%	23%
Palier 2	8	13%	38%	38%	13%
Palier 3	7	0%	57%	29%	14%

Pour les chevaux évalués en sortie de tournant à droite, on note une très forte diminution du pourcentage de boiteries de l'antérieur gauche avec l'augmentation de la vitesse. Cette tendance est vérifiée statistiquement avec un test de Kruskal-Wallis. A contrario, le pourcentage d'antérieur droit boiteux augmente nettement avec la vitesse, sans pour autant que les tests de Kruskal-Wallis ne permettent de le confirmer. On retrouve une diminution de la fréquence des boiteries du postérieur droit en sortie de tournant à droite entre les paliers 1 à 3 sans pour autant que les tests de Kruskal-Wallis ne permettent de le confirmer. Pour les membres postérieurs, le nombre de boiteries en main du postérieur gauche est supérieur au nombre de boiteries du postérieur droit (p-value = 0,020).

Tableau 49 : Répartition des boiteries par membre sur l'ensemble des chevaux évoluant à main gauche chez l'entraîneur 2 aux différents paliers de vitesse

Paliers	Données	AG	AD	PG	PD
Test en main	22	18%	14%	23%	45%
Échauffement	18	0%	39%	33%	28%
Palier 1	16	19%	19%	56%	6%
Palier 2	17	18%	29%	35%	18%
Palier 3	16	25%	19%	19%	38%

Les calculs de p-value par un test statistique de Kruskal-Wallis ne permet pas de comparer les différences de pourcentages entre les différents paliers pour les membres antérieurs.

Par contre, les tests statistiques confirment :

- Le pourcentage de membre postérieur gauche au palier 1 est significativement plus élevé que pour le postérieur gauche (p-value = 0,024).
- Pour le postérieur droit, les chevaux présentent plus fréquemment une boiterie à l'échauffement qu'aux paliers 1 (p-value = 0,015) et 3. (p-value = 0,003).

La fréquence des boiteries du postérieur droit est augmentée par rapport au premier tableau et on note une augmentation de ce pourcentage avec l'augmentation de la vitesse entre les paliers 1 à 3.

Bilan de l'impact du tournant sur la boiterie à partir des évaluations objectives :

Évaluation globale	AG : Diminution de la boiterie lorsque les chevaux sont attelés AD : Augmentation de la boiterie lorsque les chevaux sont attelés PG : Boiterie plus importante du PG que du PD surtout à main droite. Diminution de la boiterie entre les paliers 1 et 3 à gauche PD : Augmentation de la boiterie entre les paliers 1 et 3.
Sortie de tournant à droite	PD : Chevaux moins boiteux à droite. Augmentation de la boiterie avec la vitesse chez l'entraîneur 1. PG : Chevaux plus boiteux du PG que du PD mais pas d'effet de la vitesse
Sortie de tournant à gauche	PG : Diminution de la boiterie entre les paliers 1 à 3 PD : Augmentation de la boiterie entre les paliers 1 à 3

3) Impact du côté d'évaluation par le vétérinaire

La comparaison des erreurs commises par le vétérinaire lors de la partie précédente a permis de révéler un nombre d'erreurs plus important à gauche qu'à droite. Cette partie étudie la répartition des erreurs du vétérinaire en fonction du côté où sont évalués les chevaux. Il s'agit de comparer les évaluations subjectives du vétérinaire avec les données du Lameness locator.

Pour la suite de cette étude, l'ensemble des résultats ont été validés par un test de Kruskal-Wallis permettant d'obtenir une p-value. On considère que le résultat est significatif si la p-value < 0,05.

Le tableau suivant distingue les différents types d'erreurs du vétérinaire lorsque les chevaux sont évalués à droite et à gauche.

Tableau 50 : Répartition des erreurs antérieures commises par le vétérinaire sur l'ensemble des chevaux en fonction du côté où le vétérinaire évalue les chevaux

	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
A gauche	15	18%	4%	1%	3%	14%	8%	6%	0%
A droite	38	21%	5%	0%	5%	16%	2%	13%	1%

Le vétérinaire commet autant d'erreurs mineures lorsqu'il est placé à droite ou à gauche des chevaux (p-value > 0,05). Les erreurs modérées sont cependant plus fréquentes lorsqu'il est placé à droite et restent toutefois les erreurs mineures majoritaires quel que soit le côté d'évaluation.

De la même façon, le vétérinaire commet autant d'erreurs majeures s'il est placé à droite ou à gauche des chevaux (p -value $> 0,05$). Par contre, lorsqu'il est à gauche il commet plus d'erreurs de latéralisation (erreur majeure A) que de défaut de signalement (erreur majeure B). À droite, le taux d'erreurs majeures B est bien plus élevé que celui des erreurs majeures A (p -value $< 0,0001$). De plus, le vétérinaire commet plus d'erreurs majeures B à droite qu'à gauche (p -value = 0,49).

Tableau 51 : Répartition des erreurs postérieures commises par le vétérinaire sur l'ensemble des chevaux en fonction du côté où le vétérinaire évalue les chevaux

	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
A gauche	22	27%	4%	4%	0%	23%	5%	18%	0%
A droite	27	15%	3%	3%	0%	12%	3%	9%	0%

Pour les erreurs majeures, elles sont plus fréquentes lorsque le vétérinaire regarde les chevaux à gauche et contrairement aux antérieurs, les erreurs majeures B sont majoritaires quel que soit le côté d'évaluation : Les erreurs majeures B sont significativement plus fréquentes à gauche qu'à droite (p -value = 0,003), plus fréquentes que les erreurs majeures A (p -value $< 0,001$) à droite et à gauche.

Tableau 52 : Répartition des erreurs antérieures et postérieures commises par le vétérinaire et de la symétrie des erreurs sur l'ensemble des chevaux en fonction du côté où le vétérinaire évalue les chevaux

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
A gauche	41	49%	5%	16%	26%	20%	30%
A droite	74	74%	9%	38%	27%	31%	43%

Quel que soit le côté d'évaluation, le vétérinaire commet un nombre d'erreurs postérieures ou antérieures significativement plus important que le nombre d'erreurs combinées (ANT+POST) (p -value $< 0,05$). D'autre part, à droite, le vétérinaire commet plus d'erreurs antérieures que d'erreurs postérieures (p -value = 0,034). A gauche, le vétérinaire commet plus d'erreurs postérieures que d'erreurs antérieures (p -value = 0,029).

Concernant la symétrie des erreurs sur les membres droits ou gauches, quel que soit le côté d'évaluation, le nombre d'erreurs sur des membres gauches est plus élevé que sur les membres droits (p-value = 0,034 à gauche et 0,001 à droite).

Cependant, le calcul des p-value ne permet pas de mettre en évidence une différence entre les erreurs commises sur le membre droit ou gauche lorsque les chevaux sont évalués sur leur côté droit ou leur côté gauche. Il en va de même pour les erreurs à gauche.

Les tableaux suivants représentent les erreurs commises par le vétérinaire chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2 lorsque le vétérinaire est placé à droite des chevaux, évoluant eux-mêmes à main droite avec un tournant à droite.

Tableau 53 : Répartition des erreurs antérieures commises par le vétérinaire en fonction des entraîneurs sur des chevaux évoluant à main droite avec un tournant à droite

	Antérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
Entraîneur 1	23	18%	4%	0%	4%	14%	2%	11%	1%
Entraîneur 2	15	28%	5%	0%	5%	23%	3%	21%	0%

Le pourcentage d'erreurs mineures est similaire (p-value > 0,05) chez les deux entraîneurs et uniquement représenté par des erreurs modérées. De la même façon, les erreurs majeures B sont prédominantes sur les erreurs majeures A (p-value = 0,004 chez l'entraîneur 1 et p-value = 0,023 chez l'entraîneur 2). Le vétérinaire commet autant d'erreurs majeures A chez l'entraîneur 1 et l'entraîneur 2 (p-value = 0,918). Il en va de même pour les erreurs majeures B (p-value = 0,418).

Tableau 54 : Répartition des erreurs postérieures commises par le vétérinaire en fonction des entraîneurs sur des chevaux évoluant avec un tournant à droite

	Postérieurs								
	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	%Erreur mineure	COMP	MOD	%Erreur majeure	MAJ A	MAJ B	MAJ C
Entraîneur 1	22	17%	2%	2%	0%	15%	4%	11%	0%
Entraîneur 2	5	10%	5%	5%	0%	5%	1%	4%	0%

Pour les membres postérieurs, le pourcentage d'erreurs compensées est plus élevé chez l'entraîneur 2 mais les résultats doivent être interprétés avec précaution au vu du faible nombre d'évaluations par rapport au premier entraîneur.

Les erreurs majeures B restent prédominantes malgré une forte différence entre les deux entraîneurs : le nombre d'erreurs majeures B est significativement plus élevé que le nombre d'erreurs majeures A chez l'entraîneur 1 (p-value = 0,013). Chez l'entraîneur 2, les pourcentages entre les différents types d'erreurs majeurs sont similaires. De même, il n'existe

pas de différence significative entre les différents types d'erreurs en comparant les résultats chez les deux entraîneurs. Ces résultats sont à nuancer toutefois du fait du faible nombre d'évaluation chez l'entraîneur 2.

Tableau 55 : Répartition des erreurs antérieures et postérieures commises par le vétérinaire en fonction des entraîneurs sur des chevaux évoluant avec un tournant à droite

	Nombre d'erreurs	Taux d'erreurs	Erreur ANT+POST	Erreur ANT	Erreur POST	Erreur DROITE	Erreur GAUCHE
Entraîneur 1	53	41%	6%	18%	17%	16%	26%
Entraîneur 2	21	40%	2%	28%	10%	22%	18%

Chez l'entraîneur 1, le vétérinaire commet plus d'erreurs antérieures (p-value = 0,17) et postérieures (p-value = 0,026) que d'erreurs mixtes. Cependant, il n'existe pas de différence statistique entre le nombre d'erreurs antérieures et le nombre d'erreurs postérieures (p-value = 0,874) chez l'entraîneur 1.

En comparant les deux entraîneurs, le nombre d'erreurs antérieures est significativement plus élevé chez l'entraîneur 2 que chez l'entraîneur 1 (p-value = 0,049). A contrario, le nombre d'erreurs postérieures est significativement plus élevé chez l'entraîneur 1 (p-value = 0,023).

Concernant la symétrie des erreurs, le nombre d'erreurs à gauche est significativement plus élevé que le nombre d'erreurs à droite chez l'entraîneur 1 (p-value = 0,004). De plus, les erreurs à gauche sont aussi significativement plus s chez l'entraîneur 1 que chez l'entraîneur 2 (p-value = 0,05).

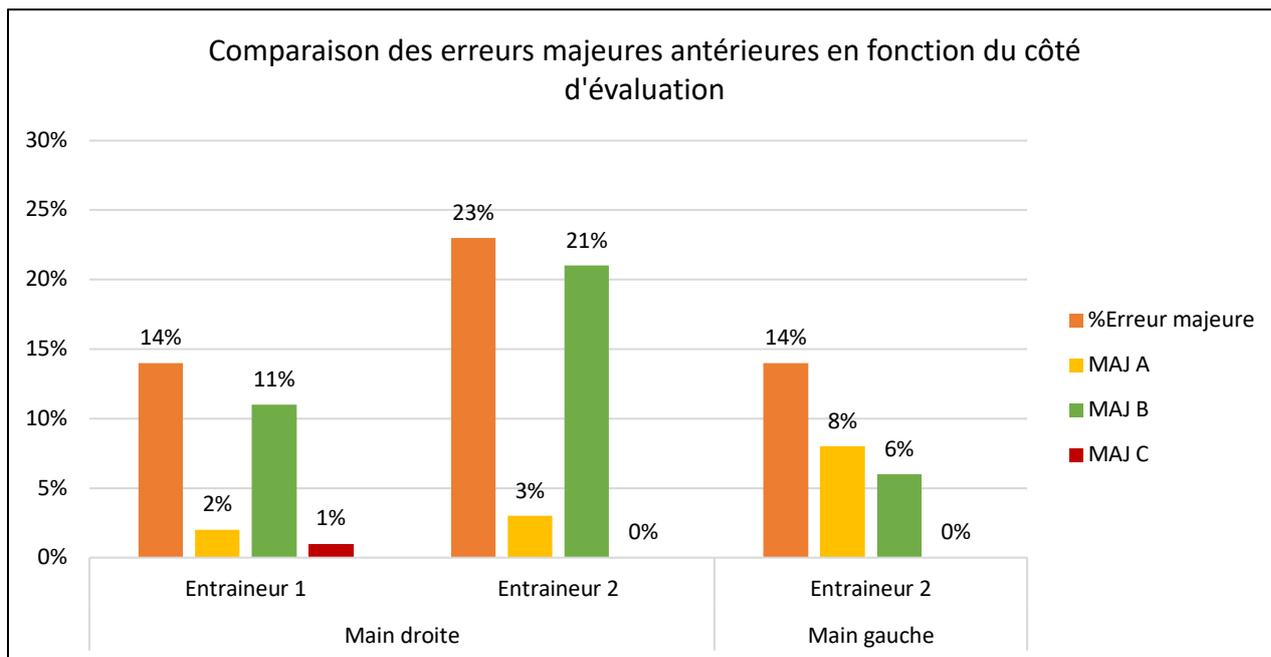


Figure 76 : Représentation graphique des erreurs majeures antérieures en fonction de la position du vétérinaire par rapport au cheval lors de l'évaluation

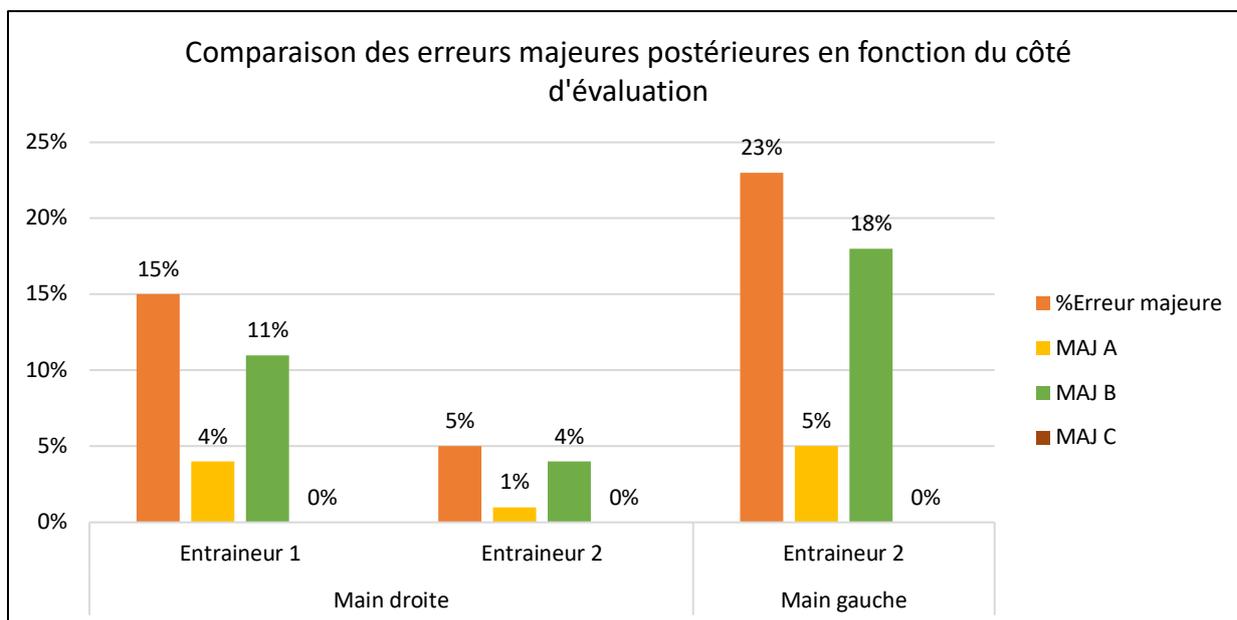


Figure 77 : Représentation graphique des erreurs majeures postérieures en fonction de la position du vétérinaire par rapport au cheval lors de l'évaluation

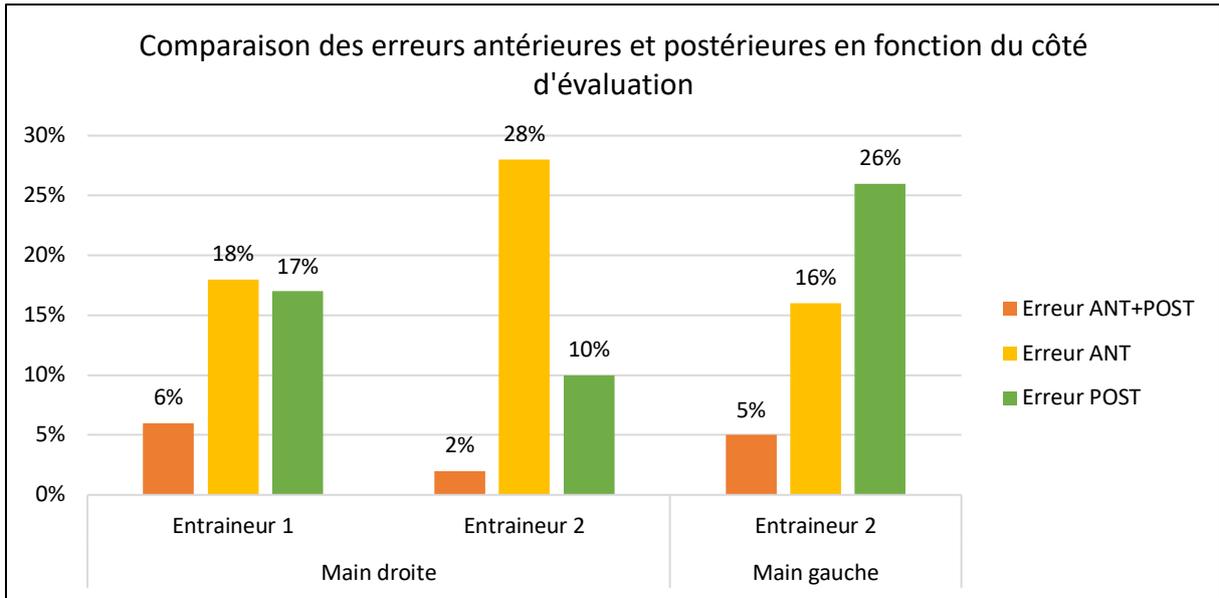


Figure 78 : Représentation graphique de la répartition des erreurs sur les membres antérieurs et postérieurs en fonction de la position du vétérinaire par rapport au cheval lors de l'évaluation

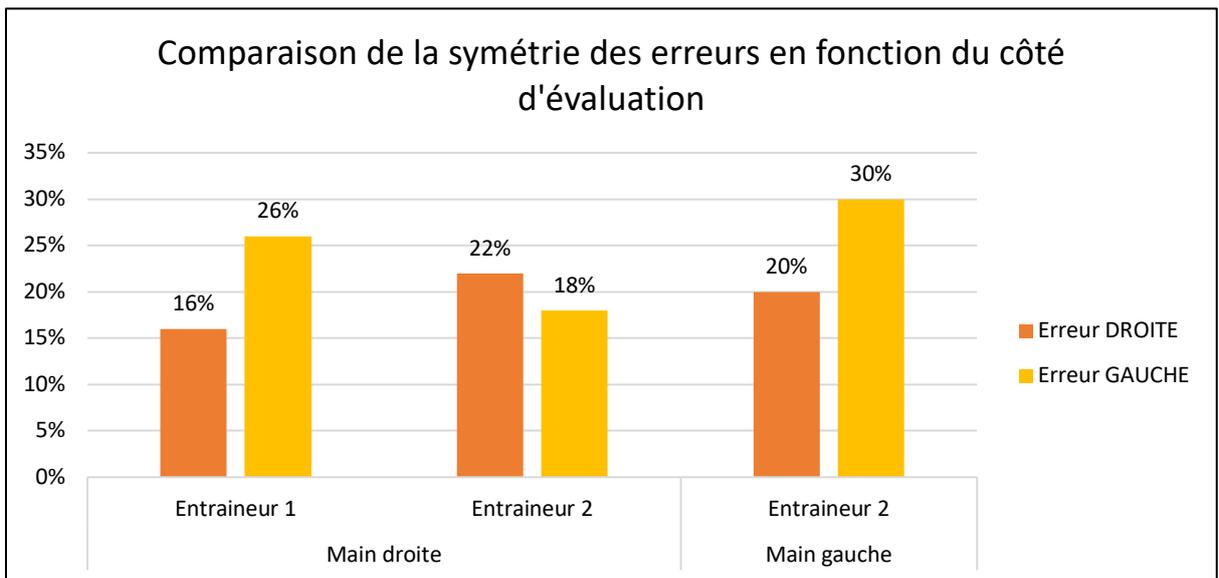


Figure 79 : Représentation graphique de la symétrie des erreurs en fonction de la position du vétérinaire par rapport au cheval lors de l'évaluation

Bilan :

Antérieurs	<p><u>Erreurs mineures :</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Plus d'erreurs modérées à droite qu'à gauche <p><u>Erreurs majeures :</u></p> <ul style="list-style-type: none">• A gauche, plus d'erreurs majeures A que d'erreurs majeures B• A droite, plus d'erreurs majeures B que d'erreurs majeures A
Postérieurs	<p><u>Erreurs mineures :</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Uniquement des erreurs de compensation <p><u>Erreurs majeures :</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Erreurs majeures B très majoritaires à droite comme à gauche et légèrement plus importantes à gauche
Symétrie	<p><u>A droite :</u> Erreurs antérieures plus nombreuses que les erreurs postérieures <u>A gauche :</u> Erreurs postérieures plus nombreuses que les erreurs antérieures</p> <p>Plus d'erreurs à gauche qu'à droite (sauf pour les chevaux évalués à droite chez l'entraîneur 2)</p>

TROISIÈME PARTIE :

DISCUSSION

I- Analyse du protocole expérimental

1) Choix des chevaux sélectionnés et des pistes d'entraînement

Dans notre étude, les choix des chevaux et des pistes d'entraînement peuvent être considérés comme des facteurs influençant les résultats obtenus.

En effet, les chevaux intégrés sont des chevaux d'âge différents, compris entre 2 et 7 ans, avec des niveaux d'entraînement variant du trotteur juste qualifié jusqu'au trotteur d'expérience. Cette diversité de chevaux crée une plus grande variabilité dans les résultats statistiques notamment lors de l'évaluation de la régularité et de la symétrie des allures pouvant être influencées par le niveau d'expérience du cheval. Elle apporte toutefois des résultats intéressants puisqu'elle représente une population plus complète et représentative de la pratique courante. De la même façon, les deux sexes de chevaux sont représentés sans distinction afin d'obtenir une population plus hétérogène.

On note toutefois que certains chevaux ont concouru entre les jours d'évaluations ce qui pourrait influencer certains paramètres de locomotion ou engendrer une boiterie suite à un temps de récupération insuffisant.

Concernant l'effectif de chevaux évalués, 20 chevaux ont été sélectionnés au départ pour participer à l'étude. Malheureusement, certains chevaux ayant été mis au repos ou participant à des courses les jours d'évaluation, ce nombre n'a été plus que de 12 chevaux au 60^{ème} jour. De plus, certains capteurs se sont déconnectés au cours des enregistrements ce qui n'a pas permis d'obtenir l'ensemble des mesures pour chaque cheval.

Si le nombre de chevaux peut sembler faible de prime abord, la répétition des mesures avec 5 paliers de vitesses à J0, J30 et J60 a tout de même permis de réaliser 265 évaluations au total.

Cette étude a été réalisée chez deux entraîneurs de trotteurs différents. Le choix de ces entraîneurs a notamment reposé sur la disponibilité du personnel et du nombre de chevaux présents dans les 60 jours à venir.

Chaque entraîneur possède une piste de forme et de qualité de sols différentes. Chez l'entraîneur 1, les chevaux sont évalués sur une piste oblongue en sable (Vigna Grosbois 0,4mm) et tournent toujours à main droite alors que chez l'entraîneur 2, l'échauffement est réalisé à main droite sur une piste de promenade et le reste de l'entraînement s'effectue sur une piste droite en sable avec sortie de virage à droite ou à gauche. La piste de l'entraîneur 2 est plus profonde et se tient moins bien en cas de pluie. L'impact de la forme de la piste a été étudié par Rhodin et al. (2016) au cours d'une étude réalisée sur des chevaux en longe à main droite ou à main gauche dont la symétrie de la locomotion était ensuite comparée à la locomotion en ligne droite. Cette dernière a notamment soulevé l'augmentation de l'asymétrie des mouvements de tête et de bassin au cours d'un tournant. L'impact du sol et du fond de forme des pistes a également fait l'objet d'une étude de Château et al. (2010) et a

permis de montrer une diminution de la longueur et une augmentation de la fréquence de la foulée sur sol souple. Les résultats de notre étude ont donc pris en compte les effets d'un changement de main en comparant les résultats obtenus chez chacun des entraîneurs. L'ensemble des mesures par le Lameness Locator et l'évaluation du vétérinaire ne sont réalisées que sur des chevaux en ligne droite après le tournant afin de s'affranchir d'une possible asymétrie lors de courbes. Il est cependant intéressant de voir que le cheval adapte sa locomotion au sens de sortie du virage ou au virage qui approche ensuite. La place du cheval par rapport à la corde est un élément majeur de la performance des trotteurs attelés, certains chevaux n'étant performants qu'à une seule corde.

De plus, les dates d'évaluation et les conditions météorologiques ne sont pas les mêmes pour l'ensemble des évaluations ce qui pourrait créer des différences de boiteries entre les deux entraîneurs et créer un biais dans les résultats statistiques. C'est pourquoi, nous avons également séparé les résultats par date d'évaluation pour chaque entraîneur. Cette distinction entre les entraîneurs réduit cependant l'effectif total des chevaux évalués et la significativité des résultats.

Les chevaux ont suivi des programmes d'entraînements différents en fonction des entraîneurs entre chaque séance d'évaluation. Ces différences d'exercices pourraient entraîner des différences de résistance physique et d'adaptation à l'exercice demandé lors des évaluations.

2) Choix du matériel utilisé

Le Lameness Locator est un système d'accélérométrie équipé de la technologie sans fil avec une liaison bluetooth entre la tablette et les différents capteurs. Cependant, il est arrivé que les capteurs se déconnectent au cours des essais lorsque la distance entre la tablette et les capteurs dépassent 100m. Cette occasion est notamment survenue lors des essais attelés quand la voiture n'était pas suffisamment proche des chevaux évalués.

Au cours des évaluations, la mise en place des capteurs a été toujours effectuée par la même personne afin d'améliorer la répétabilité des mesures et éviter les biais de positions de capteurs.

La fixité des capteurs sur le cheval est également essentielle puisqu'elle permet de réduire les mouvements parasites lorsque le cheval se déplace. Une correction automatique de certains de ces mouvements parasites est réalisée par le programme informatique du constructeur. Les systèmes de fixation fournis par le constructeur Equinosis sont adaptés à une utilisation à petite vitesse. Dans le cadre d'une étude sur des trotteurs attelés à grande vitesse, ces systèmes se sont avérés insuffisants. Le capteur de tête est placé dans un bonnet et maintenu en place avec la bride du cheval. Ce capteur est donc moins soumis aux mouvements parasites et le positionnement est aisé. Le gyroscope de l'antérieur droit est le capteur le plus soumis aux mouvements parasites car l'amplitude des mouvements du membre est plus importante de celle du tronc.

Le poids du capteur, de 30g, appliqué sur le membre antérieur droit pourrait également modifier la locomotion des chevaux. Il serait intéressant d'appliquer un capteur identique sur le membre antérieur gauche afin d'éviter tout biais et report de poids lié à ce capteur.

Le capteur de croupe est le capteur le plus complexe à placer car il nécessite de bien repérer la symétrie du bassin et peut représenter un biais pour les résultats s'il est incorrectement positionné.

3) Choix des méthodes de réalisation des tests et des enregistrements

Le choix d'une évaluation en main préalable permet de replacer l'étude dans les conditions de réalisation d'études précédemment effectuées sur le Lameness Locator. Les trotteurs ne sont cependant pas des chevaux habitués à réaliser des examens au trot en main en ligne droite ce qui peut rendre difficile l'évaluation de la locomotion et la comparaison avec des résultats obtenus sur d'autres races de chevaux.

Les conditions d'évaluation des chevaux en main chez les deux entraîneurs est différente : Chez l'entraîneur 1, les chevaux sont évalués sur une ligne droite légèrement en pente sur 50m alors que chez l'entraîneur 2, la piste est plane et de 30m de long. Ces différences peuvent modifier les résultats d'évaluation du vétérinaire qui analyse un nombre de foulées plus important chez l'entraîneur 1.

L'évaluation de trotteurs en piste a jusque-là été peu réalisée lors des études précédentes. Le choix de différents paliers de vitesse permet d'évaluer l'impact de la vitesse sur la locomotion des chevaux. Toutefois, les chevaux n'ont pas été évalués à leur vitesse maximale se rapprochant d'une vitesse atteinte en course. Ce palier de vitesse n'a pas pu être mis en place du fait d'un niveau d'expérience différent entre les chevaux.

Lors des examens en piste, la voiture du vétérinaire est placée parallèlement au cheval évalué. Cette position est adaptée à la détection de boiteries antérieures mais moins aux boiteries postérieures.

II- Analyse des résultats

1) Adaptation d'un système d'accélérométrie à l'examen locomoteur en piste

Le Lameness Locator est un système d'accélérométrie au départ adapté à l'évaluation de chevaux de sport ou de loisir dans le cadre d'un examen orthopédique en main. Les paramètres recommandés par le constructeur permettent d'obtenir des données en adéquation avec le type d'examen. Les études de Pfau et al. (2016) réalisées sur 13 chevaux de sport en main et en longe ont ainsi permis d'établir les seuils de 6mm pour les variations de hauteur de la tête et de 3mm pour les variations de hauteur du pelvis. Cependant, aucune étude réalisée à ce jour n'a évalué les seuils du Lameness Locator sur des trotteurs évalués en main et attelés. Les premiers résultats statistiques de notre étude, réalisés avec les seuils précédemment décrits montrent une réelle discordance entre le nombre de boiteries relevé par le Lameness Locator et la locomotion réelle des chevaux sélectionnés, pourtant aptes à concourir en course. Nous avons ainsi défini de nouveaux seuils de 12mm pour les variations des mouvements de la tête et de 7mm pour les variations des mouvements du bassin. Ces derniers ont été établis en choisissant comme « Gold Standard » le pourcentage de membres non boiteux donné par le vétérinaire sur l'ensemble des évaluations. Ce choix ne repose malheureusement que sur l'évaluation d'un seul vétérinaire expérimenté. De plus, l'étude statistique des erreurs commises par le vétérinaire, nous permet d'affirmer que toutes les boiteries n'ont pas forcément été détectées. Il serait donc intéressant de confirmer ces seuils en comparant les analyses de plusieurs vétérinaires. On souligne toutefois que le nombre important d'évaluations minimise le risque d'erreurs.

Aucune tendance statistique nette ne se détache quant à la modification de ces seuils en fonction de la vitesse. Ces derniers seraient donc plus liés au type de chevaux évalués et à l'examen attelé plutôt qu'à la vitesse. Cependant, les trotteurs n'ont été évalués qu'à des vitesses inférieures à celles obtenues en course. Une étude à vitesse maximale pourrait éventuellement modifier ces seuils.

2) Particularités des évaluations de trotteurs à grande vitesse

La locomotion des trotteurs en piste n'a jusque là été que peu étudiée. Son évaluation est relativement complexe car elle nécessite habitude et expérience de la part du vétérinaire et dépend de la disponibilité d'un matériel spécifique adapté à l'évaluation à grande vitesse.

L'analyse subjective du vétérinaire a permis de montrer une augmentation des boiteries de faible grade (0 ou 1) avec l'augmentation de la vitesse et une diminution des boiteries de grade 2 et 3. Starke et al. (2013) ont fait la même constatation avec une diminution subjective de la boiterie avec l'élévation de la vitesse. Les études de Peham et al. (2000) confirment que des boiteries discrètes sont peu modifiées à grande vitesse. Les trotteurs semblent donc se régulariser à plus grande vitesse, allure de travail qui semble mieux convenir à leur locomotion. En main et à l'échauffement, le nombre de boiteries détectées par le vétérinaire est plus important et probablement lié à un manque de discipline de ces chevaux à petite vitesse. Les écarts-types des données du Lameness Locator sont d'ailleurs

très élevés. Il existe donc une discordance entre l'évaluation à petite vitesse et celle à plus grande vitesse, d'où l'intérêt de réaliser un examen en condition d'exercice afin d'obtenir un examen plus représentatif des conditions réelles.

Le Lameness Locator indique également si la boiterie correspond à une phase d'impact ou de poussée. Les études statistiques montrent qu'en main, les boiteries sont essentiellement des boiteries d'impact pour les membres antérieurs comme pour les postérieurs. Lorsque les chevaux sont attelés, ce sont les boiteries de poussée qui dominent. Pour les membres postérieurs, les boiteries mixtes d'impact et de poussée sont également fortement représentées. Aucun effet de l'augmentation de la vitesse ne modifie les analyses précédentes. De même, la répartition des boiteries d'impact et de poussée sur les chevaux attelés diffère peu entre les entraîneurs. Il semble donc que le type de sol, en asphalte pour les évaluations en main et en sable à grande vitesse, influence nettement le type de boiterie. Cette réflexion a déjà fait l'objet d'études, notamment par Château et al. (2010), qui a montré que des surfaces de travail souples permettent un meilleur amortissement et une perte d'efficacité de propulsion, ce qui serait en accord avec la plus forte fréquence de boiteries de poussée en piste sablée dans notre étude. A l'inverse, des surfaces dures comme l'asphalte augmentent les forces horizontale et verticale d'impact, ce qui se retrouve également chez nos trotteurs évalués en main.

L'étude des caractéristiques de la locomotion des chevaux a été relativement bien étudiée à petite vitesse (Keegan 2007, Weishaupt 2004, etc.). Des mouvements de compensation, décrits plus tôt selon les lois des côtés 1 et 2 ont été mises en évidence. Cependant, l'analyse plus récente de la locomotion à grande vitesse a permis d'établir de nouvelles compensations, différentes de celles observées à vitesse plus réduite. Ainsi, Denoix et al. (2007) et Keegan et al. (2017) ont relevé une compensation d'une boiterie postérieure primaire par une surcharge de l'antérieur ipsilatéral et un soulagement de l'antérieur controlatéral, s'opposant à la première loi des côtés. Jusqu'alors, ce type de boiterie compensatoire n'était pas systématique et les faibles effectifs étudiés n'avaient donné qu'un aperçu des boiteries de compensation à grande vitesse. Dans notre étude, les boiteries de compensation à grande vitesse sont les plus présentes avec 42 cas au total contre 31 cas répondant à la première loi des côtés et 1 seul cas répondant à la deuxième. Ces compensations interviennent indépendamment de la piste et du palier de vitesses. Par contre, il semble que certains chevaux soient prédisposés à adopter ce type de compensation.

3) Étude de dispersion des valeurs du Lameness Locator et lien avec les erreurs commises lors de l'évaluation des chevaux à grande vitesse

La comparaison entre les données du Lameness Locator et l'évaluation subjective permet de connaître les erreurs commises par le vétérinaire et de relever les circonstances favorisant ces dernières.

Les résultats statistiques ont permis de montrer que les erreurs lorsque les chevaux sont en main sont peu représentatives de la locomotion des chevaux attelés : En main, les erreurs sur les membres antérieurs sont majoritairement des erreurs majeures B pour lesquelles le vétérinaire ne visualise pas la boiterie. Il est possible que les chevaux soient moins

réguliers à cette allure, entraînant ainsi une sur-détection de boiteries de la part du Lameness Locator. Il a d'ailleurs été nécessaire de réitérer certains essais car les écarts-types étaient trop importants et de faire la moyenne de certains essais. A contrario, lorsque les chevaux sont attelés, le nombre d'erreurs globales sur les membres antérieurs est moins important et le nombre d'erreurs majeures B augmente lorsque la vitesse augmente. Ainsi, le défaut de visualisation des erreurs au palier P3 pourrait être lié à une sous-détection de la part du vétérinaire distinguant moins les boiteries à grande vitesse.

Pour les membres postérieurs, les erreurs en main sont nettement moins importantes que sur les membres antérieurs. Les erreurs attelées sont surtout liées à un défaut de visualisation de boiteries et à un défaut de latéralisation (erreurs majeures A et B). Ces erreurs peuvent s'expliquer par la position du vétérinaire, parallèle au cheval lors des évaluations, ce qui ne permet pas une visualisation et une latéralisation optimale de la boiterie.

Lors de l'évaluation d'une boiterie postérieure, le vétérinaire évalue les mouvements de la croupe et l'engagement des postérieurs. La position de la voiture, parallèlement au cheval en mouvement permet une bonne visualisation de l'engagement des postérieurs mais crée un biais important dans l'observation de la hauteur de la croupe.

L'analyse de la dispersion des valeurs de H diff Max, H diff Min, P diff Max et P diff Min décrit la régularité des chevaux à chaque palier de vitesse. Plus la dispersion des valeurs sur l'un des paramètres est importante plus la différence de hauteur de la tête ou du bassin est importante : le risque d'erreur est diminué et le vétérinaire détecte plus facilement la boiterie. Lorsque la dispersion est faible, la différence de hauteur de la tête ou du bassin est faible et plus difficilement visualisable par le vétérinaire.

La dispersion des valeurs de H diff Min est plus importante en main que celles de H diff Max. Il semble donc que le vétérinaire évaluera plus correctement une boiterie antérieure en main en suivant les mouvements de la tête vers le bas. Lorsque les chevaux sont attelés, la dispersion des valeurs de H diff Max est supérieure à celle de H diff Min. L'étude des mouvements de la tête vers le haut permettrait ainsi de réduire le nombre d'erreurs du vétérinaire sur des chevaux à grande vitesse.

La dispersion des valeurs de P diff Max et P diff Min suit les mêmes tendances que pour les membres antérieurs. En main, il serait plus intéressant de suivre les mouvements de bassin vers le bas alors qu'avec des chevaux attelés, la variation des mouvements de bassin vers le haut semble plus informative puisque la dispersion des valeurs de P diff Min diminue avec l'augmentation de la vitesse contrairement à celle de P diff Max.

La diminution de l'amplitude des mouvements de tête et de bassin vers le bas à grande vitesse est en accord avec les résultats obtenus par Starke et al. (2013) mais ces derniers n'ont pas relevé d'augmentation des mouvements de tête et de bassin vers le haut avec la vitesse. Les conditions d'examen n'étaient cependant pas les mêmes puisque la vitesse des chevaux était laissée libre en fonction du confort du cheval.

La dispersion des paramètres de H diff Max et H diff Min est également plus importante que celle de P diff Max et P diff Min. Ces résultats se retrouvent dans les études de Drevemo et al. (1980) pour lequel les paramètres de la foulée sont hautement répétables à grande vitesse chez les trotteurs avec une meilleure régularité des postérieurs par rapport aux antérieurs. Ici, la dispersion des valeurs des postérieurs est réduite par rapport aux antérieurs ce qui indique une meilleure régularité des postérieurs lorsque les chevaux sont attelés. L'amplitude des mouvements de tête est plus importante que celle des mouvements de bassin

ce qui rend les boiteries antérieures plus simples à distinguer que celles des postérieurs. Dans notre étude, le nombre d'erreurs commises par le vétérinaire sur les membres postérieurs est effectivement plus important que celui sur les membres antérieurs.

La réalisation d'évaluations à différentes dates permet de connaître la progression de l'observateur au cours des essais : Une nette progression est notée dans la détection des boiteries antérieures entre J0 et J60. Le vétérinaire commet de moins en moins d'erreurs majeures B donc visualise mieux l'ensemble des boiteries mais commet plus d'erreurs majeures A, de latéralisation de boiteries. Pour les membres postérieurs, la progression de l'observateur est moins importante et est surtout notée entre J0 et J30 où le vétérinaire s'améliore dans la détection des boiteries de compensation. L'expérience du vétérinaire et l'habitude à évaluer des chevaux à grande vitesse permet donc de minimiser les erreurs commises lors des examens locomoteurs. Cette progression aurait peut-être été encore plus marquée si l'observateur avait eu une correction immédiate de ses erreurs par les indications du Lameness Locator après l'examen du cheval. Une comparaison de résultats subjectifs entre plusieurs vétérinaires plus ou moins expérimentés serait intéressante pour évaluer plus complètement la progression des observateurs.

4) Effet corde

Plusieurs études se sont intéressées à l'impact du tournant sur la locomotion des trotteurs. Starke et al. (2013) a ainsi démontré une locomotion des chevaux différente en fonction de leur évaluation à main droite ou à main gauche. D'autres études plus anciennes comme celles de Ludwig et al. (1932) et Bayer (1973) ont également relevé une modification de la locomotion des chevaux après le tournant ou par anticipation du tournant à venir.

L'étude des chevaux attelés à main droite ou à main gauche nous permet d'évaluer l'impact du tournant sur la locomotion. Sur l'ensemble des évaluations, la fréquence des boiteries est similaire entre l'antérieur gauche et l'antérieur droit. Les boiteries du postérieur gauche sont deux fois plus fréquentes que les boiteries du postérieur droit. Par contre, en distinguant la main à laquelle les chevaux évoluent, on remarque qu'à main gauche les chevaux sont essentiellement boiteux de leur antérieur droit. Le nombre de boiteries de ce membre est nettement plus faible en main qu'attelé et augmente avec la vitesse. Pour les postérieurs, la boiterie prédominante est celle du postérieur gauche mais les boiteries de postérieur droit restent tout de même très présentes et augmentent avec la vitesse. À main gauche, les chevaux présentent donc une boiterie antérieure et postérieure opposée au tournant et qui augmente avec la vitesse.

A main droite, les boiteries antérieures sont majoritairement des boiteries de l'antérieur gauche et du postérieur gauche. Les boiteries de l'antérieur gauche diminuent avec l'augmentation de la vitesse et sont plus fréquentes en main qu'attelés. Les boiteries du postérieur droit sont peu fréquentes bien qu'elles augmentent avec la vitesse. A main gauche, comme à main droite on retrouve donc une boiterie antérieure et postérieure opposée au tournant.

Ces statistiques ont cependant été réalisées en distinguant les chevaux évalués à main droite ou gauche chez chacun des entraîneurs ce qui participe à réduire l'effectif global et la

significativité des résultats. Une étude sur un nombre plus important de chevaux permettrait peut-être de confirmer ces résultats à plus grande échelle.

En comparant les boiteries à partir des données du Lameness Locator et en les comparant aux erreurs commises par le vétérinaire, il apparaît que plus la fréquence des boiteries est importante, plus le risque d'erreurs du vétérinaire est grand : Le nombre de boiteries antérieures est plus élevé à droite qu'à gauche et le nombre d'erreurs du vétérinaire sur les antérieurs est également plus élevé à droite qu'à gauche. À l'inverse, le nombre de boiteries postérieures et les erreurs du vétérinaire sont plus importantes à gauche qu'à droite.

La position du vétérinaire lors de l'évaluation a également son importance : Chez les deux entraîneurs, les erreurs sur les membres gauches sont plus fréquentes que sur les membres droits notamment chez l'entraîneur 1 où les chevaux ne sont évalués qu'à main droite. Il semble donc que le vétérinaire commette plus d'erreurs sur les membres qu'il visualise moins. Les erreurs sur les membres droits sont plus représentées chez l'entraîneur 2 car les chevaux sont évalués aux deux mains. Dans ce cas, le vétérinaire est placé soit à droite soit à gauche des chevaux. Il visualise donc mieux le côté droit ou gauche selon les chevaux. Une évaluation à gauche et à droite de chaque cheval permettrait probablement de réduire le nombre d'erreurs. La position optimale de détection des boiteries postérieures reste cependant celle du driver qui apprécie mieux la symétrie du bassin ou les reports de poids en étant placé derrière le cheval.

CONCLUSION

Cette étude illustre l'intérêt du recours à la méthode objective et quantitative de la locomotion dans le cadre d'examens locomoteurs sur des trotteurs à grande vitesse.

Le Lameness Locator est un outil de détection particulièrement bien adapté à l'évaluation des trotteurs en piste à grande vitesse : l'installation est rapide, les données sont collectées directement sur la tablette et sont facilement interprétables par l'observateur.

Notre étude s'inscrit dans une nouvelle dynamique par l'évaluation de la locomotion sur des trotteurs à grande vitesse, jusqu'alors peu réalisée de par la complexité à mettre en place ce type d'examen.

Malgré le développement des outils de mesures quantitatives de la locomotion, il apparaît nécessaire que l'examen orthopédique repose tout d'abord sur l'analyse visuelle du vétérinaire. En effet, les données obtenues lors des évaluations en main sont peu représentatives de la locomotion globale du trotteur, peu habitué à ce type d'exercice. D'autre part, l'étude sur les seuils de détection de boiterie révèle l'intérêt d'adapter les systèmes numériques aux conditions de terrain à partir de l'examen du vétérinaire.

L'usage du Lameness Locator permet toutefois de dégager les erreurs commises par le vétérinaire lors du diagnostic de boiterie. En effet, l'examen à grande vitesse dépasse l'acuité visuelle de l'observateur rendant certains diagnostics difficiles à établir notamment pour des boiteries de faible intensité. Nous avons ainsi montré que les erreurs de diagnostic concernent plus particulièrement les boiteries de membres postérieurs qui sont moins détectables à grande vitesse par la diminution de l'amplitude des mouvements de bassin. En accord avec certaines publications, nous avons obtenu une diminution de l'amplitude des mouvements de tête et de bassin vers le bas avec l'élévation de la vitesse et une augmentation de l'amplitude des mouvements de tête et de bassin vers le haut. Ainsi, lors de l'évaluation des trotteurs, il serait plus informatif pour le vétérinaire d'observer en main les mouvements de tête et de bassin vers le bas alors qu'en piste, il commettrait moins d'erreurs à analyser les mouvements de tête et de bassin vers le haut. De plus, la place du vétérinaire à droite ou à gauche du cheval joue également un rôle dans la qualité du diagnostic puisque le vétérinaire détecte moins bien les boiteries sur les membres qui lui sont le moins visibles.

En revanche, le Lameness Locator s'avère particulièrement intéressant dans l'analyse des mouvements de compensation à grande vitesse. En effet, le vétérinaire ne signale le plus souvent qu'un antérieur ou un postérieur boiteux sans pouvoir distinguer des phénomènes compensatoires. Le Lameness Locator donne davantage d'informations et permet de retrouver la boiterie primaire. Les phénomènes compensatoires à grande vitesse, jusqu'alors très peu étudiés, semblent être relativement fréquents d'après nos résultats.

Enfin, notre étude complète certains constats concernant l'impact du sol : un exercice sur asphalté entraîne majoritairement des boiteries d'impact tandis qu'un travail en sol souple engendre des boiteries de poussée. Le tournant joue également un rôle en provoquant une augmentation des boiteries antérieures et postérieures du côté opposé au tournant.

Ainsi, la méthode accélérométrique offre une réelle opportunité et aide au diagnostic du clinicien en lui permettant de parfaire son analyse et en lui fournissant des données supplémentaires, difficiles à distinguer notamment dans des conditions d'exercices à grande vitesse sur des boiteries de faible grade.

BIBLIOGRAPHIE

AMERICAN ASSOCIATION OF EQUINE PRACTITIONERS (1991) Guide for Veterinary Service and Judging of Equestrian Events, 4th edition. ed. Lexington KY, AAEP

ARMENTROUT A. R., BEARD W. L., WHITE B. J., et LILLICH J. D. 2012. « A Comparative Study of Proximal Hindlimb Flexion in Horses: 5 versus 60 Seconds ». *Equine Veterinary Journal* 44 (4) : 420-24.

AUDIGNIÉ F., POURCELOT P., DEGUEURCE C., GEIGER D., et DENOIX J. M. 2002. « Fourier Analysis of Trunk Displacements: A Method to Identify the Lamé Limb in Trotting Horses ». *Journal of Biomechanics* 35 (9) : 1173-82

BAILLY C. 2009. « Validation d'un système accélérométrique de quantification des boiteries chez le trotteur attelé dans les conditions de l'exercice sportif intensif ». Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort : 112.

BARREY E., AUVINET B., VAUDELIN J. L., POIREL D., VALETTE J.P. 1995. "A gait evaluation of race trotters using an accelerometric device". *Equine Veterinary Journal* 18 suppl. BARREY E. 1999. « Methods, Applications and Limitations of Gait Analysis in Horses ». *Veterinary Journal (London, England : 1997)* 157 (1): 7-22.

BARREY E. 2010. « Review: Genetics and Genomics in Equine Exercise Physiology: An Overview of the New Applications of Molecular Biology as Positive and Negative Markers of Performance and Health ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 38 (novembre) : 561-68.

BARREY, E., DESLIENS F., POIREL D., BIAU S., LEMAIRE S., RIVERO J. L. L., et LANGLOIS B. 2002. « Early Evaluation of Dressage Ability in Different Breeds ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 34 (septembre) : 319-24.

BARREY E., GALLOUX P. 1997. « Analysis of the Equine Jumping Technique by Accelerometry ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 23 (mai) : 45-49. BARREY E., DESBROSSE F. 1996. « Lameness detection using an accelerometric device ». *Pferdeheilkunde* 12 (juillet) : 617-22.

BARREY E., HERMELIN M., VAUDELIN J. L., POIREL D., et VALETTE J. P. 2010. « Utilisation of an accelerometric device in gait analysis ». *Equine Veterinary Journal* 26 (juin): 7-12.

BARREY E., EVANS S. E., EVANS D. L., CURTIS R. A., QUINTON R. et ROSE R. J. 2001. « Locomotion evaluation for racing in Thoroughbreds ». *Equine Veterinary Journal. Supplement* 33, 2001.

BRAGANDA F. M., BOSCH S., VOSKAM J. P., MARIN-PERIANU M., VAN DER ZWAA B. J., VERMOOJI J. C. M., VAN WEEREN P. R., et BACK W. 2017. « Validation of distal limb mounted inertial measurement unit sensors for stride detection in Warmblood horses at walk and trot ». *Equine Veterinary Journal* 49 (4) :

BLACK W., CLAYTON H. 2013. "Equine locomotion". Seconde édition. Chap 2.

CAURE S. Le Lameness Locator: Comment ça marche ? In: INTERFACE, Le Mans.

CHATEAU H., HOLDEN L., ROBIN D., et al. (2010) Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine Veterinary Journal* 42(s38), 488

CHURCH E. E., WALKER A. M., WILSON A. M., et PFAU T. 2009. « Evaluation of Discriminant Analysis Based on Dorsoventral Symmetry Indices to Quantify Hindlimb Lameness during over Ground Locomotion in the Horse ». *Equine Veterinary Journal* 41 (3) : 304-8.

CLAYTON H.M., SCHAMHARDT H.C. (2000) Measurement Techniques for Gait Analysis. In *Equine Locomotion*, Philadelphia : WB SAUNDERS, BACK W

COUROUCÉ A., GEOFFROY O., BARREY E., AUVINET B., et ROSE R. J. 1999. « Comparison of Exercise Tests in French Trotters under Training Track, Racetrack and Treadmill Conditions ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 30 (juillet) : 528-32.

DENOIX J-M. 1992. "Approche sémiologique des boiteries chez le cheval : premières étapes". *Le Point Vétérinaire*. Numéro 23.

CRUZ A.M., VIDONDO B., RAMSEYER A.A., MANINCHEDDA U.E. (2018) Effect of trotting speed on kinematic variables measured by use of extremity-mounted inertial measurement units in nonlame horses performing controlled treadmill exercise.

DENOIX J-M., (1992). "Approche sémiologique des boiteries chez le cheval : premières étapes". *Le point vétérinaire*. Numéro 23.

DENOIX J-M., CHATEAU H., POURCELOT P., PASQUET H., AUDIGNIÉ F., CREVIER N. 2007. "Analyse des troubles locomoteurs à grande vitesse". *33^{ème} journée de la recherche équine*.

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

DUBREUCQ C., CHATARD J. C., COUROUCE A., et AUVINET B. 2010. « Reproducibility of standardized exercise test for Standardbred Trotters under field conditions ». *Equine Veterinary Journal* 27 (juin): 108-12.

DURAND E. 2014. « Les boiteries pelviennes du cheval: étude comparative entre l'examen orthopédique direct visuel, l'examen différé par vidéo et les résultats d'un système de données objectives: Equine Lameness Locator® ». *Vet Agro Sup*.

DYSON S., MURRAY R., et PINILLA M. 2017. « Proximal Suspensory Desmopathy in Hindlimbs: A Correlative Clinical, Ultrasonographic, Gross Post Mortem and Histological Study ». *Equine Veterinary Journal* 49 (1) : 65-72.

KEEGAN K. G. 2007. « Evidence-Based Lameness Detection and Quantification ». *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 23 (2): 403-23.

FRIES M., MONTAVON S., SPADAVECCHIA, et LEVIONNOIS O. 2017. « Evaluation of a Wireless Activity Monitoring System to Quantify Locomotor Activity in Horses in Experimental Settings ». *Equine Veterinary Journal* 49 (2) : 225-31.

GALLOUX P., JIMENEZ M., RICHARD N., et DRONKA T. 1994. « Program Persival. Analysis of the movement of the saddle using accelerometric technics in order to simulate the three gaits of the horse by 6 degrees-freedom plateform. » *20ème Journée d'étude*, 2 mars 1994.

GUSTAS P., JOHNSTON C., ROEPSTORFF L., DREVEMO S., et H. LANSHAMMAR H. 2004. « Relationships between Fore- and Hindlimb Ground Reaction Force and Hoof Deceleration Patterns in Trotting Horses ». *Equine Veterinary Journal* 36 (8): 737-42.

HAMMARBERG M., A. EGENVALL T., PFAU, et RHODIN M. 2016. « Rater agreement of visual lameness assessment in horses during lungeing ». *Equine Veterinary Journal*

HEWESTON M., CHRISTLEY R. M., HUNT I. D., et VOUTE L. C. 2006. « Investigations of the Reliability of Observational Gait Analysis for the Assessment of Lameness in Horses ». *The Veterinary Record* 158 (25): 852-57.

ISHIHARA, AKIKAZU, BERTONE A. L., et PAIYI J. R-S. 2005. « Association between Subjective Lameness Grade and Kinetic Gait Parameters in Horses with Experimentally Induced Forelimb Lameness ». *American Journal of Veterinary Research* 66 (10): 1805-15.

LANOVAZ J. L., CLAYTON H. M. et WATSON L. G. 1998. « In vitro attenuation of impact shock in equine digits ». *The Equine Hoof*, 1998.

KEEGAN K. G., DENT E. V., WILSON D. A., JANICEK J., KRAMER J., LACARRUBBA A., WALSHS D. M., et al. 2010. « Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses ». *Equine Veterinary Journal* 42 (2) : 92-97.

KEEGAN K. G., KRAMER J., YOSHIBARU Y., HIROMITCHI M., PAI P. F., DENT E. V., KELLERMAN T. E., WILSON D. A., et REED S. K. 2011. « Assessment of Repeatability of a Wireless, Inertial Sensor-Based Lameness Evaluation System for Horses ». *American Journal of Veterinary Research* 72 (9) : 1156-63.

KEEGAN K. G., MACALLISTER C. G., WILSON D. A., GEDON C. A., KRAMER J., YOSHIBARU Y., HIROMITCHI M., et PAI P.F. 2012. « Comparison of an Inertial Sensor System with a Stationary Force Plate for Evaluation of Horses with Bilateral Forelimb Lameness ». *American Journal of Veterinary Research* 73 (3) : 368-74.

KEEGAN K. G., WILSON D. A., KRAMER J., REED S. K., YOSHIBARU Y., HIROMITCHI M., PAI P. F., et LOPES M. A. F. 2013. « Comparison of a Body-Mounted Inertial Sensor System-Based Method with Subjective Evaluation for Detection of Lameness in Horses ». *American Journal of Veterinary Research* 74 (1)

KEEGAN K. G., YOSHIBAHARU Y., Frank PAI P. F., WILSON D. A., et KRAMER J. 2004. « Evaluation of a Sensor-Based System of Motion Analysis for Detection and Quantification of Forelimb and Hind Limb Lameness in Horses ». *American Journal of Veterinary Research* 65 (5) : 665-70.

KELMER G., KEEGAN K. J., KRAMER J., WILSON D. A., PAI F. P., et SINGH P. 2005. « Computer-Assisted Kinematic Evaluation of Induced Compensatory Movements Resembling Lameness in Horses Trotting on a Treadmill ». *American Journal of Veterinary Research* 66 (4) : 646-55.

LELEU C., GLORIA A., RENAULT G., et BARREY E. 2002. « Analysis of Trotter Gait on the Track by Accelerometry and Image Analysis ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 34 (septembre) : 344-48.

MALIY S., VOUTE L., LUND D., et MARSHALL J. F. 2013. « An Inertial Sensor-Based System Can Objectively Assess Diagnostic Anaesthesia of the Equine Foot ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 45 (décembre) : 26-30.

MARSHALL J. F., LUND D. G., et VOUTE L.C. 2012. « Use of a Wireless, Inertial Sensor Based System to Objectively Evaluate Flexion Tests in the Horse ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 43 (décembre): 8-11.

MCCARTY C. A., THOMASON J. J., GORDON K., BURKHART T., et BIGNELL W. 2015. « Effect of Hoof Orientation and Ballast on Acceleration and Vibration in the Hoof and Distal Forelimb Following Simulated Impacts Ex Vivo ». *Equine Veterinary Journal* 47 (2) : 223-29.

MCCRACKEN M. J., KRAMER J., KEEGAN K., LOPES M., WILSON D. A., REED S. K., LACARRUBBA A., et RASCH M. 2012. « Comparison of an Inertial Sensor System of Lameness Quantification with Subjective Lameness Evaluation ». *Equine Veterinary Journal* 44 (6) : 652-56.

PARSONS K. J., et WILSON A. M. 2006. « The Use of MP3 Recorders to Log Data from Equine Hoof Mounted Accelerometers ». *Equine Veterinary Journal* 38 (7) : 675-80.
PFAU T., PARKES R. S., BURDEN E. R., BELL N., FAIRHURST H., et WITTE T. H. 2015. « Movement asymmetry in working polo horses ». *Equine Veterinary Journal* 48 (4) : 517-22.

PFAU T., SPICER-JENKIN C., SMITH R. K., BOLT D., FISKE-JACKSON A., et WITTE T. H. 2014. « Identifying Optimal Parameters for Quantification of Changes in Pelvic Movement Symmetry as a Response to Diagnostic Analgesia in the Hindlimbs of Horses ». *Equine Veterinary Journal* 46 (6) : 759-63.

PFAU T., et WELLER R. 2017. « Comparison of a Standalone Consumer Grade Smartphone with a Specialist Inertial Measurement Unit for Quantification of Movement Symmetry in the Trotting Horse ». *Equine Veterinary Journal* 49 (1): 124-29.

POURCELOT P., AUDIGNIÉ F., DEGUEURCE C., DENOIX J. M., et GEIGER D. 1997. « Kinematic Symmetry Index : A Method for Quantifying the Horse Locomotion Symmetry Using Kinematic Data ». *Veterinary Research* 28 (6) : 525-38.

RETTIG M. J., LEELAMANKONG P., RUNGSRI P., et LISCHER C. J. 2016. « Effect of Sedation on Fore- and Hindlimb Lameness Evaluation Using Body-Mounted Inertial Sensors ». *Equine Veterinary Journal* 48 (5): 603-7.

RHODIN M., L. ROEPSTORFF A., KEEGAN K. G, PFAU T., et EGENVALL A. 2016. « Head and Pelvic Movement Asymmetry during Lungeing in Horses with Symmetrical Movement on the Straight ». *Equine Veterinary Journal* 48 (3): 315-20.

RYAN C. T., SCHAER B. L., et NUMAKER D. M. 2006. « A Novel Wireless Data Acquisition System for the Measurement of Hoof Accelerations in the Exercising Horse. » *Equine Veterinary Journal* 38 (7) : 671-74.

SCHUMACHER J., DEGRAVES F., CESAR F., et DURAN S. 2013. « Efficacy of ketamine hydrochloride administered as a basilar sesamoid nerve block in alleviating foot pain in horses caused by natural disease ». *Equine Veterinary Journal* 46 (5) : 639-41.

SCHUMACHER J., TAINTOR J., DEGRAVES F., SCHRAMME M., et WILHITE R.. 2013. « Function of the Ramus Communicans of the Medial and Lateral Palmar Nerves of the Horse ». *Equine Veterinary Journal* 45 (1) : 31-35.

STARKE S. D., WILLEMS E., HEAD M., MAY S. A., et PFAU T. 2012. « Proximal hindlimb flexion in the horse : Effect on movement symmetry and implications for defining soundness ». *Equine Veterinary Journal* 44 (6) : 657-63.

UHLIR C., LICKA T., KUBBER P., PEHAM C., SCHEIDL M., et GIRTLER D. 1997. « Compensatory Movements of Horses with a Stance Phase Lameness ». *Equine Veterinary Journal. Supplement*, n° 23 (mai) : 102-5.

VIRY S., DE GRAAF J. B., FRANCES J.-P., BERTON E., LAURENT M., et NICOL C. 2015. « Combined Influence of Expertise and Fatigue on Riding Strategy and Horse-rider Coupling during the Time Course of Endurance Races ». *Equine Veterinary Journal* 47 (1) : 78-82.

WATTS, ASHLEE E., DABARCINER R., MARSH C., G. CARTER K., et CUMMINGS K. J. 2016. « A Randomized, Controlled Trial of the Effects of Resveratrol Administration in Performance Horses with Lameness Localized to the Distal Tarsal Joints ». *Journal of the American Veterinary Medical Association* 249 (6) : 650-59.

WEISHAUPT M.A., WIESTNER T., HOGG H. P., JORDAN P., AUER J.A. 2006
« Compensatory Load Redistribution of Horses with Induced Weight-Bearing Forelimb

NANTES, 2020

NOM : POINSARD

PRENOM : Philippine

TITRE : Comparaison de l'évaluation subjective et objective des boiteries par un système d'accélérométrie chez le trotteur en main puis attelé : étude expérimentale

RÉSUMÉ : Les progrès informatiques et technologiques des 25 dernières années ont permis de révolutionner l'étude de la locomotion chez le cheval. L'usage de dispositifs miniaturisés comme le Lameness Locator offre un système de détection des boiteries particulièrement performant et adapté à une évaluation des trotteurs à l'exercice.

Notre étude s'inscrit dans une nouvelle dynamique par l'évaluation de la locomotion sur 19 trotteurs attelés et évalués à grande vitesse, jusqu'alors peu réalisée de par la complexité à mettre en place ce type d'examen. Ce travail a pour objectif de comparer les évaluations orthopédiques subjectives du vétérinaire avec les données de locomotion obtenues avec le Lameness Locator.

Tout d'abord, un rappel bibliographique permet de revenir sur les différentes techniques subjectives et objectives d'évaluation orthopédique du cheval. L'étude est réalisée sur 19 chevaux trotteurs soumis à un test d'effort en main puis attelés à vitesse croissante. L'analyse des résultats montre que les données obtenues lors des évaluations en main sont peu représentatives de la locomotion globale du trotteur et qu'un examen attelé permet de compléter le diagnostic. D'autre part, l'étude sur les seuils de détection de boiterie révèle l'intérêt d'adapter les systèmes numériques aux conditions de terrain à partir de l'examen du vétérinaire. Ensuite, l'examen à grande vitesse dépasse l'acuité visuelle de l'observateur rendant certains diagnostics difficiles à établir notamment pour des boiteries postérieures de faible intensité. Par ailleurs, il semblerait plus facile pour le vétérinaire d'observer en main les mouvements de tête et de bassin vers le bas alors qu'en piste, il commettrait moins d'erreurs à analyser les mouvements de tête et de bassin vers le haut. De plus, la place du vétérinaire à droite ou à gauche du cheval joue également un rôle dans la qualité du diagnostic. Enfin, un exercice sur asphalté entraîne majoritairement des boiteries d'impact tandis qu'un travail en sol souple engendre des boiteries de poussée. Le tournant joue également un rôle en provoquant une augmentation des boiteries antérieures et postérieures du côté opposé au tournant.

MOTS CLÉS : TROTTEUR FRANÇAIS (RACE EQUINE) ; LOCOMOTION ; CHEVAL ; BOITERIE ; ACCÉLÉROMÉTRIE ; ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

JURY :

Président : Monsieur le professeur Yves MAUGARS
Rapporteur : Madame le Docteur Caroline TESSIER
Assesseur : Monsieur le professeur Claude GUINTARD
Membre invité : Monsieur Sébastien CAURE

ADRESSE DE L'AUTEUR

La Lion / Cuon
49150, BAUGÉ-EN-ANJOU

Imprimerie COREP